Dimensionamento de um Pórtico Rolante

Fernando José Granja Ribeiro

Dissertação do MIEM

Orientador: Prof. Carlos Manuel Balboa Reis Gomes

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Junho de 2011

Resumo

Neste trabalho apresentou-se a metodologia de dimensionamento de um Pórtico rolante, tendo por base as Normas F.E.M, Fédération Européenne De La Manutention e o Eurocódigo 3. As normas FEM abordam questões específicas relativas a estruturas e aparelhos de movimentação de cargas onde se incluem o caso das pontes rolantes e dos pórticos rolantes.

No decurso do projecto foram abordadas as seguintes questões: Definição das solicitações sobre a estrutura de acordo com as normas F.E.M; Anteprojecto das secções resistentes segundo o REAPE; Determinação dos esforços na estrutura, recorrendo a um software de análise estrutural, *Multiframe3D.*; Verificação da resistência de acordo com o EC 3 e as Normas F.E.M.; Dimensionamento e selecção de elementos mecânicos como moto-redutores, blocos de rodas; Elaboração dos desenhos de projecto finais.

Abstract

The Project of an Portal Crane is done according to general rules of metallic structures (Eurocode 3) and specific rules for overhead travelling cranes which are known as FEM rules (Fédération Européenne De La Manutention). The objective of this work is precisely the project of a Portal Crane according to those rules.

The project involved the following steps:

- Definition of actions applied to the structure according to FEM
- The use these actions and simplified assumptions of strength of materials and structural analysis allowed a first pre-design of sections dimensions for pillars and beams.
- A structural analysis using Multiframe 3D software to determine in the structure for different positions of the travelling crane.
- Check section strength using Eurocode 3 and FEM rules
- Project and selection of mechanical components such as motors and wheels.

And finally the elaboration of definition drawings

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador Prof. Carlos Manuel Balboa Reis Gomes pela disponibilidade prestada ao longo de todo o projecto, e pelos conselhos e conhecimento transmitido, dada sua grande experiencia na área das estruturas metálicas.

Gostaria também de agradecer ao Eng. Rodrigo Massa da TEGOPI, pela disponibilidade e conselhos dados acerca de aspectos construtivos dos pórticos rolantes.

Agradecer também, aos meus pais Alberto e Alice e aos meus irmãos Carlos e Ana Teresa, pela paciência e apoio dado ao longo da dissertação.

Índice

Resumo iii
Abstract iii
Agradecimentos v
Índice de figuras ix
Índice de tabelas xiii
1. Pontes e Pórticos rolantes 1
1.1. Pontes rolantes 1
1.2. Pórticos rolantes 2
2. Objectivos 5
3. Bases de cálculo 7
4. Definição das solicitações segundo as Normas F.E.M 9
4.1. Classificação do grupo de operação do carro-guincho 9
4.1.1. Espectro de carga 9
4.1.2. Tempo Médio de funcionamento diário 10
4.2. Escolha do tipo de carro-guincho 11
4.3. Solicitações a entrevirem no cálculo das estruturas metálicas 14
4.3.1. Solicitações principais 14
4.3.2. Solicitações devidas aos movimentos verticais 14
4.3.3. Solicitações devidas aos movimentos horizontais 15
4.3.4. Solicitações originadas pelos efeitos climáticos 20
4.4. Casos de Solicitações 25
5. Dimensionamento do pórtico rolante 27
5.1. Dimensões do pórtico rolante 27
5.2. Tipo de ligações entre a viga resistente e os pilares 28
5.3. Pré-dimensionamento da estrutura 29
5.3.1. Definição das secções com base no Pré-dimensionamento 32
5.4. Definição do esquema estático de toda a estrutura 39
5.5. Análise de esforços da estrutura 44
5.6. Verificação das Secções ao Estado Limite Último 58
5.6.1. Viga resistente V1 e V2 58
5.6.2. Travessa M3 e M4 83
5.6.3. Travessa D5 e D7 89

5.6.4. Diagonal D6 e D8 91
5.6.5. Pilar P9,P10,P11 e P12 94
5.6.6. Carros Laterais C13 e C14 104
5.7. Verificação do Estado Limite de Utilização 114
6. Dimensionamento dos Elementos Mecânicos 117
6.1. Dimensionamento das Rodas 117
6.2. Escolha do tipo de Moto-Redutor 125
7. Dimensionamento das Ligações Aparafusadas 127
7.1. Ligação viga resistente – pilar 128
7.2. Ligação travessa (M3 e M4) – viga resistente 137
7.3. Ligação diagonal (D6 e D8) - pilar 141
7.4. Ligação pilar – carro lateral 144
7.5. Ligação carro lateral bloco de rodas 150
8. Dimensionamento dos Cordões de Soldadura 151
8.1. Ligação viga resistente – pilar 151
8.2. Ligação travessa (M3 e M4) – viga resistente 153
8.3. Ligação diagonal (D6 e D8) - pilar 157
8.4. Ligação pilar – carro lateral 159
8.5. Viga resistente 163
9. Conclusão 165
10. Bibliografia 167
Anexos 169
Anexo 1 – Grupo do carro-guincho 171
Anexo 2 – Catálogo do carro-guincho 173
Anexo 3 – Dimensões (www.vincteknobank.com) 177
Anexo 4 – Catálogo dos moto-redutores e bloco de rodas 179
Anexo 5 – Catálogo dos grampos de fixação 183

Índice de figuras

Figura 1.1 – Ponte Rolante Monoviga Caixão 1
Figura 1.2 – Ponte Rolante Biviga Caixão / Ponte Rolante em consola 2
Figura 1.3 - Pórtico Monoviga Caixão 3
Figura 1.4 – Pórtico Rolante Biviga / Semi-Pórtico Rolante 3
Figura 2.1 – Pórtico Rolante 5
Figura 4.1– Espectro de carga (baixo/médio) 9
Figura 4.2 – Espectro de carga (alto/muito alto) 10
Figura 4.3 – Vista de frente do carro guincho 12
Figura 4.4 – Pormenor da roda 12
Figura 4.5 – Vista lateral "A" 12
Figura 4.6 – Carro/Reacções 13
Figura 4.7 – Força de inércia longitudinal ao trilho da viga resistente 16
Figura 4.8 – Cociente p/a 19
Figura 4.9 – Reacções transversais ao trilho da viga resistente 20
Figura 4.10 – Secção caixão 22
Figura 4.11 – Distância entre perfis / Razão se solidez 23
Figura 5.1 – Dimensões do pórtico rolante 27
Figura 5.2 - Dimensões do pórtico rolante 28
Figura 5.3 – Esquema estático (viga resistente) 29
Figura 5.4 – Esquema estático 30
Figura 5.5 – Secção viga resistente 32
Figura 5.6 – Secção RHS 33
Figura 5.7 – Secção HEB 33
Figura 5.8 – Pórtico Rolante 39
Figura 5.9 – Excentricidade das reacções verticais do carro-guincho 43
Figura 5.11 – Pórtico rolante/identificação dos elementos estruturais 45
Figura 5.10 – Posições sucessivas do Carro - Guincho 45
Figura 5.12 – Diagrama de momentos 47
Figura 5.13 – Diagrama de momentos 47
Figura 5.14 – Esforços transversos 48
Figura 5.15 – Esforços transversos 48
Figura 5.16 – Esforço Normal 49

Figura 5.17 – Torção 49
Figura 5.18 – Diagrama de momentos 51
Figura 5.19 – Diagrama de momentos 51
Figura 5.20 – Esforços Normais 52
Figura 5.21 – Esforços transversos 52
Figura 5.22 – Esforços transversos 53
Figura 5.23 – Torção 53
Figura 5.24 – Diagrama de momentos 54
Figura 5.25 – Diagrama de momentos 55
Figura 5.26 – Esforços Normais 55
Figura 5.27 – Esforços transversos 56
Figura 5.28 – Esforços transversos 56
Figura 5.29 – Torção 57
Figura 5.30 – Secção viga resistente 58
Figura 5.31 – Distribuição de momentos 62
Figura 5.32 – Distribuição de momentos 62
Figura 5.33 – Degradação da carga sobre o trilho 70
Figura 5.34 – Secção Caixão 70
Figura 5.35 – Placa 74
Figura 5.36 – Secção caixão - Centro de Massa 78
Figura 5.37 – Secção caixão - Centro de Massa 81
Figura 5.38 – Secção SHS 83
Figura 5.39 – Distribuição de momentos 86
Figura 5.40 – Distribuição de momentos 86
Figura 5.41 – Secção CHS 89
Figura 5.42 – Secção CHS 91
Figura 5.43 – Secção RHS 94
Figura 5.44 - Comprimento $\boldsymbol{le, x}$ / $\boldsymbol{le, y}$ 96
Figura 5.45 – Distribuição de momentos 99
Figura 5.46 – Distribuição de momentos 99
Figura 5.47 – Secção HEB 104
Figura 5.48 – Distribuição de momentos 107
Figura 5.49 – Distribuição de momentos 107
Figura 5.50 – Deformada do Pórtico – Rolante (Todas as solicitações) 115

Figura 5.51 – Deformada do Pórtico – Rolante (Cargas Verticais - Peso do Carro + Carga Nominal) 115
Figura 5.52 - Deformada do Pórtico – Rolante (Todas as solicitações) 116
Figura 6.1 – Grampo de Fixação/Componentes (9) 120
Figura 6.2 – Carril sobre base metálica 121
Figura 6.3 – Detalhe do cordão de soldadura (9) 121
Figura 6.4 – Degradação da carga sobre o trilho 122
Figura 6.5 – Resistência ao rolamento 125
Figura 7.1 – Flange T 127
Figura 7.2 – Esforços instalados no parafuso 128
Figura 7.3 – Distribuição de forças do nó rígido 129
Figura 7.4 – Identificação das fiadas 131
Figura 7.5 – Geometria da ligação 131
Figura 7.6 – Esquema da ligação/esforços instalados na ligação 137
Figura 7.7 – Distribuição de forças 138
Figura 7.8 – Geometria da ligação do elemento 141
Figura 7.9 – Esforços no parafuso (corte B-B) 144
Figura 7.10 – Distribuição de forças do nó rígido (corte A-A) 145
Figura 7.11 – Geometria da ligação/identificação das fiadas 145
Figura 7.12 – Corte B-B 147
Figura 7.13 – Blocos de rodas /Posição dos parafusos 150
Figura 8.1 – Pormenor dos cordões de soldadura 151
Figura 8.2 – Esforços no cordão de soldadura 152
Figura 8.3 – Pormenor dos cordões de soldadura/esforços instalados na ligação 153
Figura 8.4 – Corte A-A 155
Figura 8.5 – Pormenor dos cordões de soldadura 157
Figura 8.6 – Pormenor dos cordões de soldadura 159
Figura 8.7 – Esforços no cordão de soldadura 159
Figura 8.8 – Pormenor dos cordões de soldadura 161
Figura 8.9 – Pormenor dos cordões de soldadura 163

Índice de tabelas

Tabela 4.1 – Determinação do Grupo de Operação do Carro Guincho 11
Tabela 4.2 – Dimensões do carro guincho 13
Tabela 4.3 – Valores de acelerações e tempos de aceleração 17
Tabela 4.4 – Pressão e velocidade do vento 21
Tabela 4.5 – Coeficientes de forma 22
Tabela 4.6 – Coeficientes de blindagem ($\boldsymbol{\eta}$) 24
Tabela 4.7 – Valores do coeficiente de majoração $\boldsymbol{\gamma c}$ 25
Tabela 5.1 – Propriedades da secção 32
Tabela 5.2 – Propriedades da secção 33
Tabela 5.3 – Propriedades da secção 33
Tabela 5.4 – Esforços máximos instalados na estrutura, para a posição do carro $\boldsymbol{P1}$ 46
Tabela 5.5 – Esforços máximos instalados na estrutura, para a posição do carro $\boldsymbol{P2}$ 50
Tabela 5.6 – Esforços máximos instalados na estrutura, para a posição do carro $\boldsymbol{P7}$ 50
Tabela 5.7 – Esforços máximos instalados na estrutura, para a posição do carro $\boldsymbol{P10}$ 54
Tabela 5.8 – Esforços máximos instalados na estrutura, para a posição do carro $\boldsymbol{P13}$ 57
Tabela 5.9 – Esforços nas secções críticas (Viga resistente) 58
Tabela 5.10 – Propriedades da secção 58
Tabela 5.11 – Coeficiente de enfunamento 67
Tabela 5.12 – Esforços na secção crítica (Travessa M3 e M4) 83
Tabela 5.13 – Propriedades da secção 83
Tabela 5.14 – Propriedades da secção 89
Tabela 5.15 – Propriedades da secção 91
Tabela 5.16 – Esforços nas secções críticas (Viga resistente) 94
Tabela 5.17 – Propriedades da secção 94
Tabela 5.18 – Esforços na secção crítica (Carros Laterais C13 e C14) 104
Tabela 5.19 – Propriedades da secção 104
Tabela 5.20 – Verificação do Estado Limite de Utilização (Todas as solicitações) 114
Tabela 5.21 – Verificação do ELU (Cargas Verticais - Peso do Carro + Carga Nominal) 115
Tabela 5.22 – Verificação do Estado Limite de Utilização (Todas as solicitações) 116
Tabela 6.1 – Reacções máximas nas rodas 117
Tabela 6.2 – Reacções mínimas nas rodas 117

Tabela 6.3 – Dimensões do carril DIN 536 118
Tabela 6.4 – Dimensões dos carris DIN 536 119
Tabela 6.5 – Carga admissível por roda (SR-E-400) 119
Tabela 7.1 – Valores dos esforços actuantes (Posição $\boldsymbol{P7}$ do carro guincho) 128
Tabela 7.2 – Valores dos esforços actuantes (Posição $\boldsymbol{P1}$ do carro guincho) 137
Tabela 7.3 – Valores dos esforços actuantes (Posição $\boldsymbol{P13}$ do carro guincho) 144
Tabela 8.1 – Valores dos esforços actuantes (Posição $\boldsymbol{P7}$ do carro guincho) 151
Tabela 8.2 – Valores dos esforços actuantes na ligação (Posição $\boldsymbol{P1}$ do carro guincho) 153
Tabela 8.3 – Valores dos esforços actuantes (Posição $\boldsymbol{P13}$ do carro guincho) 159

1. Pontes e Pórticos rolantes

As pontes e pórticos rolantes são equipamentos de elevação e movimentação de cargas que respondem a uma grande variedade de aplicações, através das suas diversas tipologias:

- Ponte Rolante Monoviga
- Ponte Rolante Biviga
- Ponte Rolante Suspensa
- Pórtico Rolante Monoviga
- Pórtico Rolante Biviga
- Semi-Pórtico Rolante

1.1. Pontes rolantes

Uma ponte rolante é um aparelho de elevação móvel, que circula numa via, a qual se designa por caminho de rolamento. Pode ser constituída por uma viga, designadas por pontes monoviga figura 1.1, ou duas vigas, designadas por pontes biviga figura 1.2, sobre as quais se desloca transversalmente um carro guincho. (1)

Figura 1.1 – Ponte Rolante Monoviga Caixão

Figura 1.2 – Ponte Rolante Biviga Caixão / Ponte Rolante em consola

Em seguida tem-se os constituintes principais destes tipos de pontes:

Carro guincho – Este é responsável pela elevação da carga. Possui um conjunto de rodados que permitem o movimento de translação sobre a viga principal quer se trate de monoviga ou biviga

Carros laterais – Os carros laterais são equipamentos que para além de transferirem a carga para o caminho de rolamentos, permitem também o movimento longitudinal da ponte.

Caminho de rolamento – É constituído por duas vigas, uma em cada extremo da ponte rolante. Trata-se de uma viga contínua com vão idêntico ao afastamento entre pórticos. No caso de pontes rolantes de carga nominal baixa, apoiam directamente sobre consolas curtas, directamente soldadas aos pilares do pavilhão. No caso de grandes cargas são utilizados pilares de baioneta.

Viga resistente – É o elemento resistente principal, e pode ser formado por um perfil laminado ou secção em caixão para vencer vãos maiores e para uma maior capacidade de carga, sobre esta desloca-se o carro guincho.

1.2. Pórticos rolantes

Os pórticos rolantes são equipamentos geralmente utilizados para aplicações em áreas exteriores a edifícios. Os movimentos de translação do carro e do pórtico permitem a colocação da carga com bastante liberdade. O corpo principal é constituído por pórticos, que dependendo do nível de cargas a movimentar serão construídos por perfis laminados ou vigas caixão. Os pórticos assentam sobre uma plataforma móvel sobre carris. Tal

como no caso das pontes rolantes pode-se também distinguir dois tipos de pórticos rolantes, monoviga (figura 1.3) e biviga (figura 1.4).

Figura 1.3 - Pórtico Monoviga Caixão

Figura 1.4 – Pórtico Rolante Biviga / Semi-Pórtico Rolante

Os constituintes básicos dos pórticos rolantes são os mesmos que para as pontes rolantes vistas no ponto anterior. Neste caso o caminho de rolamento é constituído por um sistema de carris fixados ao solo. Existem também sistemas mais especializados constituídos por pórticos rolantes auto, assentes sobre rodados e sem caminho de rolamento fixo.

2. Objectivos

O objectivo deste trabalho é o projecto de um Pórtico Rolante, e de todos os elementos que o constituem (moto-redutores, blocos de rodas, grampos de fixação do carril entre outros), o pórtico terá como local de trabalho uma pedreira, e deverá contemplar as seguintes características.

1. Localização: Amarante fora da zona urbana;
2. Operação no exterior;
3. Carga nominal: 30 ton ;
4. Vão: 13 m entre pilares;
5. Altura livre: 9 m ;
6. Velocidade do pórtico: $40m/min$;
7. Número de horas de trabalho: 8 $horas/dia$;
8. Extensão do percurso do pórtico: 50 m;

Figura 2.1 – Pórtico Rolante

3. Bases de cálculo

As solicitações sobre o pórtico rolante foram de definidas de acordo com a norma da **Federation Europeenne De La Manutention (F.E.M 1.001 3rd Editon - 1998 " Rules for the design of hoisting appliances")**. (2)

As normas F.E.M definem as solicitações sobre a estrutura, e os componentes mecânicos para a movimentação do pórtico e da carga. Estas normas F.E.M estão divididas em 8 cadernos, sendo que cada um deles aborda aspectos técnicos distintos. Na presente dissertação apenas serão referenciados os cadernos 1,2 e 3.

Caderno 1 define o objectivo e domínio de aplicação, sendo que o objectivo é determinar as solicitações e combinações de solicitações a ter em conta no projecto dos aparelhos de elevação e de impor as condições de resistência e de estabilidade, relativamente ao domínio de aplicação diz respeito ao cálculo de aparelhos de elevação, ou partes de aparelhos de elevação.

O caderno 2 debruça-se sobre á classificação dos aparelhos de elevação e define as solicitações na estrutura metálica e nos mecanismos.

O caderno 3 diz respeito ao cálculo das tensões e verificação da segurança, no entanto o projecto e verificação da segurança da estrutura pórtico e das ligações foram efectuados segundo EN 1993 Eurocódigo 3: Projecto de Estruturas de Aço. (3). Actualmente a utilização do EC3 tem ainda um carácter facultativo, pois o regulamento em vigor é o Regulamento de Estruturas em aço para Pontes e Edifícios (REAPE). (4)

4. Definição das solicitações segundo as Normas F.E.M

Nos pontos a seguir e tendo por base as Normas F.E.M (caderno 2) serão definidas as solicitações sobre o pórtico rolante.

4.1. Classificação do grupo de operação do carro-guincho

A classificação do grupo do carro guincho foi efectuada de acordo com a norma (FEM/ISO). Esta classificação permite-nos definir 2 grupos, o primeiro referente a resistência do pórtico rolante através do grupo de estrutura (A1, …A8), o segundo grupo define a resistência do carro guincho e dos outros mecanismos (1Bm, 1Am,2m …4m). (anexo 1)

O Grupo é definido, tendo em conta os seguintes aspectos:

- Espectro de carga;
- Tempo médio de funcionamento diário;

4.1.1. Espectro de carga

O espectro de carga define o tipo de utilização do equipamento, em função dos diferentes níveis de carga e a percentagem do tempo de utilização de cada um desses níveis. Essa classificação é efectuada de acordo com as figuras 4.1 e 4.2.

Este espectro de carga é definido nos gráficos abaixo.

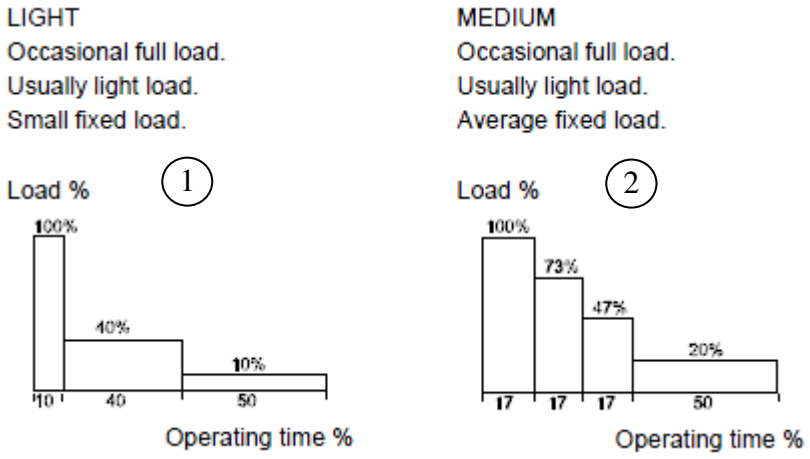


Figura 4.1– Espectro de carga (baixo/médio)

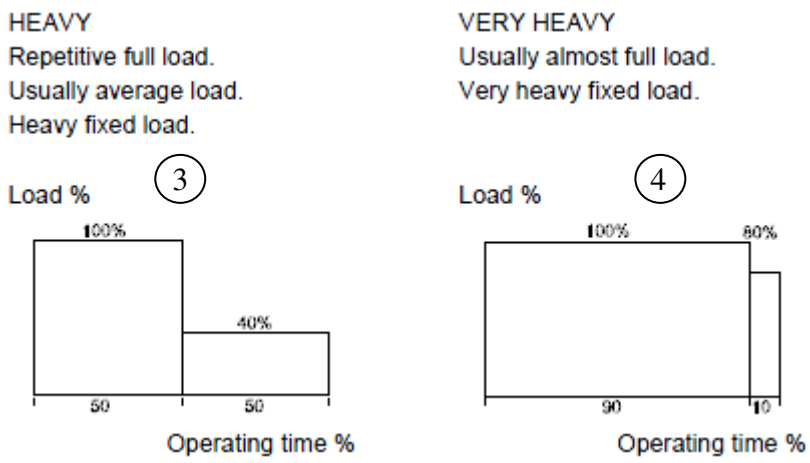


Figura 4.2 – Espectro de carga (alto/muito alto)

O pórtico rolante tem como local de trabalho uma pedreira, a capacidade máxima foi definida como sendo de 30 toneladas, e como tal definiu-se que o pórtico apenas operará a carga máxima em cerca de 17% do tempo de operação, no restante tempo assumiu-se que o espectro de carga segue a distribuição da figura 4.2 2, sendo assim definiu-se o espectro de carga **Médio**.

4.1.2. Tempo Médio de funcionamento diário

O tempo médio de funcionamento diário pode ser calculado a partir da seguinte expressão em [horas / dia].

$$t = \frac{2 \times H \times N \times T}{V \times 60}$$

Onde,

H – $altura\ média\ de\ elevação\ [m]$;

N – $número\ de\ ciclos\ de\ trabalho\ por\ hora\ [ciclos\ /\ h]$;

T – $tempo\ de\ trabalho\ diário\ [h]$;

V – $velocidade\ de\ elevação\ [m\ /\ min]$;

Com uma altura média de elevação $H = 9/2 = 4{,}5\ m$, com um número de ciclos por hora de $N = 4\ [ciclos\ /h]$, tempo de trabalho diário de $T = 8\ [h]$ e com uma velocidade de elevação de $V = 4{,}0\ [m/min]$, obtêm-se

$$t = \frac{2 \times 4{,}5 \times 4 \times 8}{4{,}0 \times 60} = 1{,}2\ [horas/\ dia]$$

Definido o espectro de carga como sendo **Médio**, e o tempo médio de funcionamento diário igual $\boldsymbol{t = 1,2\ [horas/\ dia]}$, o grupo de operação do carro guincho é determinado através da tabela 4.1.

Da tabela abaixo tem-se que o carro guincho pertence ao grupo de trabalho **M4/1Am** (Nota: se a extensão do percurso sobre a qual o pórtico rola, fosse muito grande teria que se aumentar o grupo dos mecanismos para 1Bm ou 2m, pois estes teriam muito mais horas de trabalho quando comparadas com as do carro guincho), para o grupo da estrutura definiu-se também como sendo do grupo **A4**, uma vez que o espectro de carga e número de ciclos é igual ao do carro-guincho.

Tabela 4.1 – Determinação do Grupo de Operação do Carro Guincho

Load spectrum	Average daily operating time (hours per day) ISO/FEM					
	≤ 0.5	≤ 1	≤ 2	≤ 4	≤ 8	≤ 16
LIGHT			M3 1Bm	M4 1Am	M5 2m	M6 3m
MEDIUM		M3 1Bm	M4 1Am	M5 2m	M6 3m	M7 4m
HEAVY	M3 1Bm	M4 1Am	M5 2m	M6 3m	M7 4m	
VERY HEAVY	M4 1Am	M5 2m	M6 3m	M7 4m		

4.2. Escolha do tipo de carro-guincho

Uma vez definido o grupo do carro-guincho e definida a carga nominal de elevação, está-se em condições de escolher o tipo de carro. Consultando o catálogo da empresa STAHL (anexo 2), optou-se por um carro do tipo **AS 7080-16 L2**, carro este que reúne as características necessárias e apresenta uma velocidade de elevação de $V_L = 4\ m/min$.

As restantes características do carro necessárias ao dimensionamento do pórtico são apresentadas de seguida, onde se tem as dimensões principais do carro guincho (distância entre rodas, distancia entre eixos, diâmetro das rodas entre outras) e as reacções nas rodas.

Dimensões do carro guincho

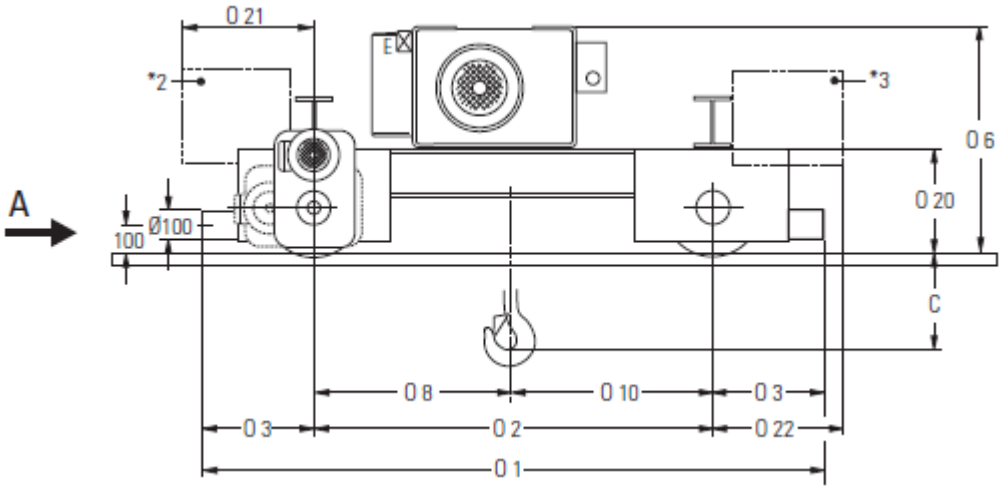


Figura 4.3 – Vista de frente do carro guincho

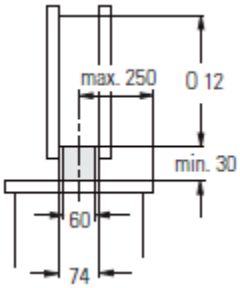


Figura 4.4 – Pormenor da roda

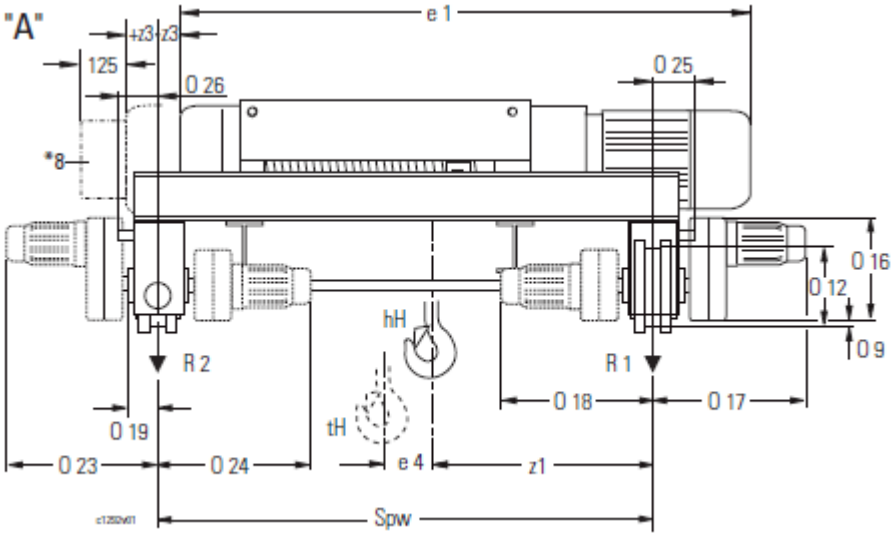


Figura 4.5 – Vista lateral "A"

Tabela 4.2 – Dimensões do carro guincho

Dimensão	[mm]	Dimensão	[mm]
O 1	2084	O 17	743
O 2	1500	O 22	476
O 3	292	O 23	743
O 6	835	O 24	743
O 8	765	z 1	1277
O 10	735	e 4	246
O 12	ϕ 250	Spw	2800

Reacções nas rodas

De acordo com o catalogo da STAHL as reacções na rodas são dadas por,

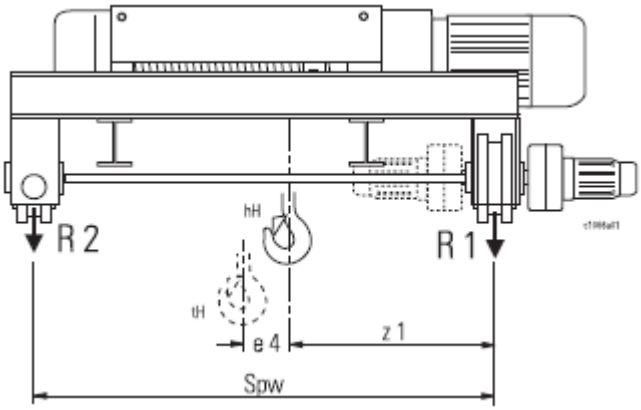


Figura 4.6 – Carro/Reacções

$$R_{1_{máx}} = \frac{Spw - z1}{2 \times Spw} \times Q + 0{,}3 \times Go$$

$$R_{2_{máx}} = \frac{z1 + e4}{2 \times Spw} \times Q + 0{,}2 \times Go$$

Onde,

$R1, R2 - Reacções\ nas\ rodas\ (sem\ coeficiente\ de\ majoração)$

$Q(kg) - Capacidadede\ elevação$

$Go(kg) - Peso\ próprio\ (carro + guincho)$

$Spw, z1, e4 -$ Ver figur 4.5 e 4.6

Com, $Q = 32000\ kg$, $Go = 3320\ kg\ (ver\ anexo\ 2)$, $Spw = 2800\ mm$, $z1 = 1277\ mm$ e $e4 = 246\ mm$.

Então as reacções nas rodas são dadas por,

$$R_{1_{máx}} = \frac{2800 - 1277}{2 \times 2800} \times 32000 + 0{,}3 \times 3320 = 9699\ kg$$

$$R_{2_{máx}} = \frac{1277 + 246}{2 \times 2800} \times 32000 + 0{,}2 \times 3320 = 9367\ kg$$

4.3. Solicitações a entrevirem no cálculo das estruturas metálicas

O cálculo das estruturas metálicas é desenvolvido, estabelecendo como determinantes, os esforços originados na estrutura aquando do seu funcionamento. Estes esforços são calculados tendo em conta as solicitações abaixo definidas:

a) Solicitações principais que actuam sobre a estrutura metálica do aparelho supondo que este se encontra imóvel, no caso da carga mais desfavorável;
b) As solicitações devidas ao movimento verticais;
c) As solicitações devidas aos movimentos horizontais;
d) As solicitações originadas pelos efeitos climáticos;

4.3.1. Solicitações principais

As solicitações principais compreendem:

- As solicitações devidas ao peso próprio dos elementos: S_G
- As solicitações devidas à carga de serviço: S_L

Todas as solicitações serão determinadas assumindo, que os elementos móveis se encontram na posição mais desfavorável.

4.3.2. Solicitações devidas aos movimentos verticais

Estas solicitações são provocadas por dois factores: pela elevação da carga de serviço e acelerações/desacelerações que ocorrem no movimento de elevação, e pelos choques originados pelo rolamento do aparelho sobre o caminho de rolamento.

4.3.2.1. Solicitações originadas pela elevação da carga de serviço

São tidas em conta as oscilações provocadas pela elevação da carga multiplicando as reacções originadas por um factor denominado de " coeficiente dinâmico ". O valor do coeficiente dinâmico ψ a aplicar à solicitação devida a carga de serviço é dado por,

$\psi = 1 + \xi \times V_L$

Onde,

$\xi - coeficiente\ experimental;$

$V_L - velocidade\ de\ elevação\ [m/s];$

Com um coeficiente experimental $\xi = 0{,}6$ e com uma velocidade de elevação de $V_L = 4\ [m/min]$.

Então vem,

$$\psi = 1 + 0{,}6 \times \frac{4}{60} = 1{,}04$$

No entanto as Normas F.E.M (caderno 2 ponto 2.2.2.2.1.1) referem, que o coeficiente ψ calculado, nunca deverá ser menor que 1,15, sendo assim o valor do coeficiente dinâmico usado será igual a $\boldsymbol{\psi = 1{,}15}$. Apenas serão considerados os efeitos da elevação da carga multiplicando-a pelo coeficiente de majoração dinâmico ψ. Pois a consideração dos outros fenómenos, é tão gravoso quer para a estrutura metálica quer para os equipamentos mecânicos, que é necessário fixar o princípio que as juntas do caminho de rolamento estarão sempre em boas condições.

4.3.3. Solicitações devidas aos movimentos horizontais

As solicitações devidas aos movimentos horizontais são:

a) Os efeitos originados pelas forças de inércia, devidas as acelerações /desacelerações, dos movimentos de translação horizontais, que serão determinados em função do valor da aceleração/desaceleração;

b) Os efeitos da força centrífuga;

c) As reacções horizontais transversais provocadas pelo rolamento;

d) Os efeitos de choque contra fins de curso;

4.3.3.1. Efeitos horizontais devidos as acelerações e desacelerações

Nos pontos de seguida serão abordadas as solicitações horizontais devidas as acelerações e desacelerações, então tem-se:

1) Devido ao movimento de arranque e paragem do **Carro Guincho**, resultam forças de inércia, na direcção longitudinal ao trilho da viga resistente (figura 4.7).

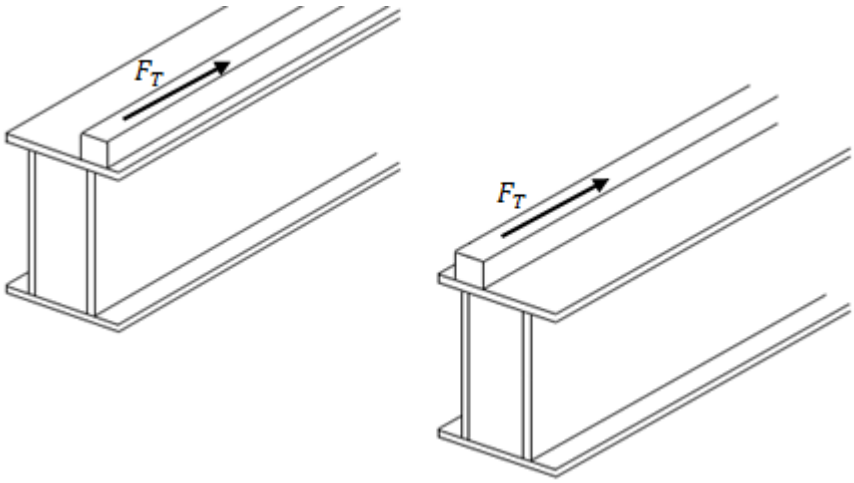


Figura 4.7 – Força de inércia longitudinal ao trilho da viga resistente

De acordo com o catálogo da empresa STAHL, a velocidade de movimentação horizontal do carro-guincho é de $V_H = 20\ m/min \cong 0{,}33\ m/s$. Com a velocidade a ser alcançada pelo carro-guincho, é possível e de acordo com a tabela 4.3 das Normas F.E.M, calcular a aceleração e tempo de aceleração do carro.

Tabela 4.3 – Valores de acelerações e tempos de aceleração

Velocidade a ser alcançada	a) Velocidade moderada e grande extensão de		b) Velocidade moderada e alta para aplicações		c) Elevada velocidade com e elevada aceleração	
m/s	Tempo de aceleração s	Aceleração m/s^2	Tempo de aceleração s	Aceleração m/s^2	Tempo de aceleração s	Aceleração m/s^2
4,00			8,0	0,50	6,0	0,67
3,15			7,1	0,44	5,4	0,58
2,5			6,3	0,39	4,8	0,52
2	9,1	0,22	5,6	0,35	4,2	0,47
1,60	8,3	0,19	5,0	0,32	3,7	0,43
1,00	6,6	0,15	4,0	0,25	3,0	0,33
0,63	5,2	0,12	3,2	0,19		
0,40	4,1	0,098	2,5	0,16		
0,25	3,2	0,078				
0,16	2,5	0,064				

De acordo com a tabela acima, para uma velocidade de cerca de $V_H = 0{,}33\ m/s$ e para o caso a, obtêm-se uma aceleração de $a_m = 0{,}089\ m/s^2$ e consequentemente um tempo de aceleração $T_m = V_H/a_m = 0{,}33/0{,}089 = 3{,}7\ s$.

De acordo com a Norma o cálculo da força de inércia segue, os seguintes passos:

Massa equivalente

Para este caso a massa equivalente, apenas será igual à massa do carro-guincho pois não temos peças em rotação, e na massa equivalente não entra a carga a elevar.

$$m_{eq} = m_0 = 3320\ kg$$

Cálculo do μ

$$\mu = \frac{m_1}{m_{eq}} = \frac{32000}{3320} = 9{,}6$$

Onde, m_{eq} é a massa equivalente e m_1 é a massa da carga nominal.

Cálculo do ψ_h

Como $\mu > 1$, o valor do coeficiente ψ_h é dado segundo as Normas F.E.M por,

$$\psi_h = [2 + \mu + (1/\mu)]^{0.5} = [2 + 9{,}6 + (1/9{,}6)]^{0.5} = 3{,}4$$

Cálculo da força de Inércia F_T

A força de inércia será igual ao produto da massa pela aceleração (ou desaceleração) resultante do movimento de arranque ou paragem do carro e da carga.

$$F_T = \psi_h \times \frac{1}{2} m_{eq+carga\ nominal} \times a_m$$

$$F_T = 3{,}4 \times \frac{1}{2}(3320 + 32000) \times 0{,}089 = 5{,}4\ kN$$

2) Devido ao movimento de arranque e paragem do **Pórtico Rolante**, resultam forças de inércia. Estas forças de inércia serão assumidas como uniformemente distribuídas sobre a estrutura pórtico.

Para a velocidade do pórtico foi adoptada uma velocidade de $V_P = 40\ m/min \cong 0{,}67\ m/s$. De acordo com a tabela 4.3, para uma velocidade de $V_P = 0{,}67\ m/s$ e para o caso b, obtêm-se uma aceleração de $a_m = 0{,}19\ m/s^2$ e consequentemente um tempo de aceleração $T_m = V_P/a_m = 0{,}67/0{,}19 = 3{,}5\ s$.

O cálculo das forças de inércia devidas ao movimento de arranque e paragem do pórtico rolante será efectuado depois de ser feito o pré-dimensionamento.

4.3.3.2. Efeitos da força centrífuga

Os efeitos da força centrífuga não se aplicam ao caso de estudo.

4.3.3.3. Reacções transversais provocadas pelo rolamento do carro

Estas reacções são transversais ao trilho sobre o qual o carro guincho ira rolar, e são devidas por exemplo a elevação oblíqua de cargas, travagem do carro-guincho, irregularidades das rodas ou trilhos e desalinhamentos entre os trilhos. Segundo as Normas F.E.M, esta reacção transversal é obtida multiplicando a carga vertical nas rodas por um coeficiente λ, que depende do cociente entre a bitola (p) e a distância entre eixos do carro guincho (a).

A Norma não é muito explícita quanto ao sentido destas forças, e como tal foi considerado a pior situação, ou seja, a situação mais gravosa para a estrutura, que é considerar as quatro forças todas com o mesmo sentido (ver figura 4.9).

As dimensões p e a, já foram anteriormente definidas obtendo-se assim,

$$\frac{p}{a} = \frac{2800}{1500} = 1{,}9$$

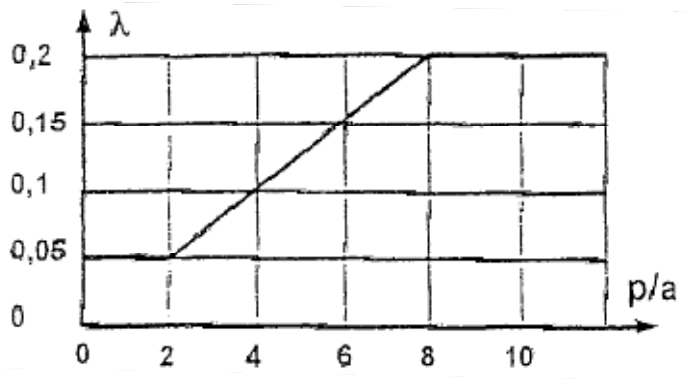


Figura 4.8 – Cociente p/a

O valor de $\lambda = 0{,}05$ é obtido a partir da Figura 4.8

A reacções máximas calculadas nas rodas no ponto 4.2 foram de $R_{1_{máx}} = 97\ kN$ e $R_{2_{máx}} = 93{,}7\ kN$. A reacção transversal será dada por,

$$R_{T1} = R_{1máx} \times 0{,}05 = 97 \times 0{,}05 = 4{,}9\ kN$$

$$R_{T2} = R_{2máx} \times 0{,}05 = 93{,}7 \times 0{,}05 = 4{,}7\ kN$$

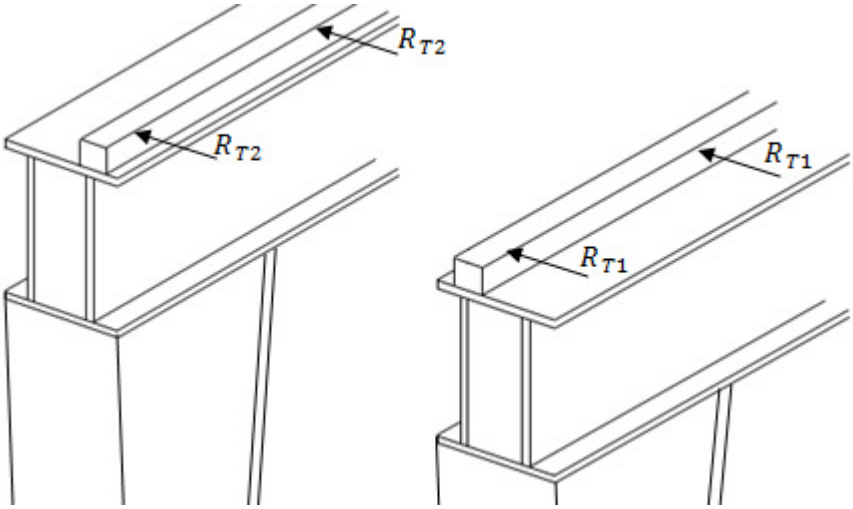


Figura 4.9 – Reacções transversais ao trilho da viga resistente

4.3.3.4. Efeitos de choque contra fins de curso

Os efeitos de choque contra fins de curso podem ocorrer em duas situações, a primeira é relativa ao choque entre o carro-guincho e os batentes de fim de curso a segunda é relativa ao choque do pórtico rolante contra os batentes de fim decurso que se encontram aplicados no solo.

No entanto estes efeitos não serão considerados, pois a ponte rolante será equipada com equipamento de detecção de aproximação dos batentes de fim de curso e os batentes de fim de curso serão equipados com mecanismos de amortecimento de impacto como por exemplo borracha (neoprene) ou amortecedores. Na norma F.E.M (caderno 2 ponto 2.2.3.4), refere que para velocidades inferiores a $0{,}7\ m/s$ os efeitos de choque podem ser desprezados e no presente projecto tem-se para o carro-guincho $V_H = 0{,}33\ m/s$ para o pórtico tem-se $V_{H,pórtico} = 0{,}67\ m/s$, velocidades estas que são inferiores a $0{,}7\ m/s$.

4.3.4. Solicitações originadas pelos efeitos climáticos

As solicitações devidas aos efeitos climáticos resultam da acção do vento, neve e variações da temperatura, no caso em análise apenas se justifica considerar a acção do vento sobre a estrutura (pórtico rolante).

Segundo a norma F.E.M e por simplificação do método é assumido que, o vento sopra em qualquer direcção horizontal, com velocidade constante e trata-se de uma acção estática aplicada à estrutura da ponte.

Pressão do vento

A pressão dinâmica do vento é dada por: $q = 0{,}613 \times V_s^2$

Onde q é a pressão dinâmica em N/m^2, e V_s é a velocidade do vento em m/s.

A velocidade do vento pode ser obtida, através da tabela abaixo, para 3 tipos situações, (eventualmente poderia usar-se uma velocidade que não conste da tabela, uma velocidade media do local de trabalho da ponte).

Tabela 4.4 – Pressão e velocidade do vento

Tipo de aparelho	Pressão do vento N/m^2	Velocidade do vento m/s
Gruas sujeitas a ventos fracos	125	14
Gruas normais instaladas no exterior	250	20
Gruas que trabalham sobre ventos fortes	500	28

Para o caso em análise considerou-se, uma grua do tipo normal instalada no exterior e como tal considera-se uma velocidade de $V_s = 20\ m/s \Rightarrow q = 250\ N/m^2$.

Cálculo da força do vento

A força do vento é dada por,

$F_1 = A \times q \times Cf$

Onde,

$F - Força\ do\ vento\ em\ [N]$;

$A - Área\ efectiva\ frontal\ em\ \ [m^2]$;

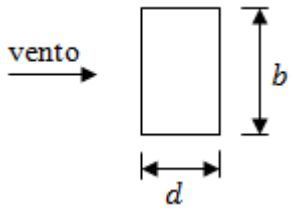
$q - Pressão\ dinâmica\ do\ vento\ em\ [N/m^2]$;

$Cf - Coeficiente\ de\ forma$;

Determinação do coeficiente de forma

O cálculo deste coeficiente de forma será calculado com recurso a tabela abaixo, a tabela apresentada na Norma F.E.M, é uma tabela mais extensa pois contempla mais tipos de secções.

Tabela 4.5 – Coeficientes de forma

Descrição	Esbeltes Aerodinâmica l/b						
	≤ 5	10	20	30	40	50	>50
Secções rectangulares ocas b/d							
 2	1,55	1,75	1,95	2,10	2,20		
1	1,40	1,55	175	1,85	1,90		
0,5	1,0	1,20	1,30	1,35	1,40		
0,25	0,8	0,90	0,90	1,0	1,0		

Para consulta desta tabela, é necessário antes definir dois factores, o primeiro é denominado de esbeltes aerodinâmica e o segundo razão da secção, pois a estrutura resistente será composta por secções em caixão.

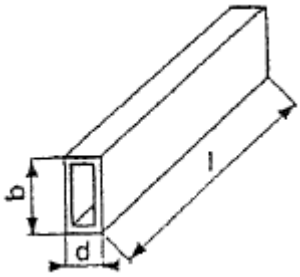


Figura 4.10 – Secção caixão

Esbeltes aerodinâmica

$$\frac{l}{b}$$

Onde, l é o comprimento da secção e b a altura da secção.

Razão da secção

$$\frac{b}{d}$$

Onde, b é a altura da secção e d a largura da secção.

Definida a área secção e o coeficiente de forma, é possível calcular a força do vento.

O pórtico rolante é constituído por dois pórticos, pelo que quando o vento sopra numa determinada direcção, o pórtico a jusante é menos afectado com a pressão do vento pois o primeiro pórtico faz "blindagem". A Norma F.E.M tem em conta este facto, aplicando á força do vento um factor de blindagem η.

Para consulta da tabela que dá esse coeficiente, é necessário antes definir dois factores, o primeiro denominado de razão de espaçamento e o segundo razão de solidez.

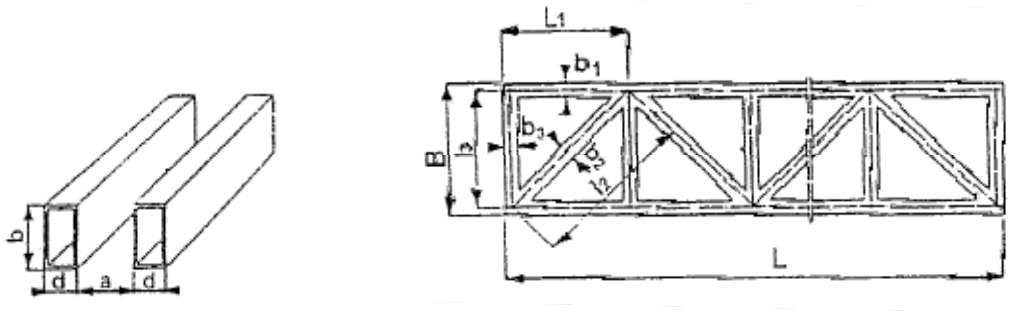


Figura 4.11 – Distância entre perfis / Razão se solidez

Razão de espaçamento

$$\frac{a}{b}$$

Onde, a é a distância entre pórticos e b a altura da secção.

Razão de solidez

$$\frac{A}{A_e} = \sum_{1}^{n} [(l_i \times b_i)/(L \times B)] = 1$$

Onde, A é a área total e A_e a área parcial.

Nota: Apesar de ainda não estarem definidas as áreas, a razão se solidez é 1, pois as secções em caixão serão completamente tapadas.

Com os factores definidos a cima, e consultando a tabela 4.6, obtêm-se o coeficiente blindagem η.

Tabela 4.6 – Coeficientes de blindagem ($\boldsymbol{\eta}$)

Razão de espaçamento a/b	Razão de solidez A/A_e					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	≥ 0,6
0,5	0,75	0,40	0,32	0,21	0,15	0,10
1,0	0,92	0,75	0,59	0,43	0,25	0,10
2,0	0,95	0,80	0,63	0,50	0,33	0,20
4,0	1,0	0,88	0,76	0,66	0,55	0,45
5,0	1,0	0,95	0,88	0,81	0,75	0,68
6,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

A força do vento para o segundo pórtico é idêntica à do primeiro mas multiplicada por o coeficiente de blindagem,

$$F_2 = \eta \times A \times q \times Cf \ [N]$$

O cálculo das forças do vento será efectuado depois de ser feito o pré-dimensionamento da estrutura pórtico, pois só nessa altura é que se estará em posse da área resistente ao vento.

Acção do vento sobre a carga

De acordo com a Norma deve ser também considerada, a acção do vento sobre a carga, a Norma sugere que para cargas sólidas (que é o caso) seja considerada uma área mínima de $0{,}5\ m^2$ por tonelada.

Então,

$$F = A \times q = (0{,}5 \times 32) \times 250 = 4\ kN$$

Em termos de análise dos esforços sobre a estrutura esta acção será aplicada como uma carga uniformemente distribuída. A carga por metro é dada por,

$$F_{metro} = \frac{F}{l_{viga} + 2h_{pilar}} = \frac{4}{13 + 2 \times 9} = 0{,}13\ kN/m$$

4.4. Casos de Solicitações

As normas F.E.M referem 3 casos de solicitação, de acordo com a presença ou não de vento e o caso de acções de carácter excepcional (ex: ventos muito fortes e testes de carga através da aplicação de outros coeficientes de majoração):

Caso I – Funcionamento da ponte sem consideração da acção do vento;

Caso II – Funcionamento da ponte com consideração da acção do vento;

Caso III – Funcionamento da ponte com consideração de acções de carácter excepcional;

Para o projecto em estudo apenas se considerou o Caso II (Funcionamento da ponte com consideração da acção do vento), onde são tomados em consideração as solicitações estáticas resultantes do peso próprio S_G, as solicitações resultantes da carga de serviço S_L multiplicadas pelo coeficiente dinâmico ψ, solicitações horizontais S_H, e por fim as solicitações devidas ao vento S_W. Todas estas solicitações foram anteriormente definidas de acordo com a Norma. O conjunto das solicitações deve ser multiplicado por um coeficiente de majoração γ_c, de acordo com a expressão abaixo.

$$\gamma_c(S_G + \psi \times S_L + S_H) + S_w$$

O valor do coeficiente de majoração γ_c, é obtido do grupo na qual a ponte esta classificada. Para uma ponte do grupo **A4**, e consultando a tabela 4.7 obtêm-se $\boldsymbol{\gamma_c = 1,08}$.

Tabela 4.7 – Valores do coeficiente de majoração $\boldsymbol{\gamma_c}$

Grupo do aparelho	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
γ_c	1,00	1,02	1,05	1,08	1,11	1,14	1,17	1,20

Nota: A verificação das secções será efectuada segundo o EC3, tendo por base todas as indicações a nível de coeficientes de segurança do caderno 3 das normas **F.E.M**. De acordo com a Norma a tensão de cedência para o caso de solicitação II deverá ser dividida por um coeficiente de segurança de $\gamma = 1{,}33$, este coeficiente será adoptado também no **EC3** contrariamente ao que este propõe que é um coeficiente de $\gamma = 1{,}1$.

5. Dimensionamento do pórtico rolante

O projecto inclui duas fases. Um pré-dimensionamento utilizado para definir uma primeira aproximação às necessidades em termos de secções resistentes. Nesta fase será utilizado o REAPE (Regulamento de Estruturas d Aço para Edifícios e Pontes) (4). Uma vez definidas as solicitações sobre o pórtico rolante, o cálculo dos esforços instalados na estrutura será efectuado utilizando software **Multiframe 3D**. A verificação da estabilidade final será efectuada com base no Eurocódigo 3 (3).

Mas antes de se proceder ao pré-dimensionamento, é necessário definir as dimensões do pórtico rolante, estas são estabelecidas de seguida.

5.1. Dimensões do pórtico rolante

O pórtico será utilizado numa pedreira para movimentação de blocos de pedra. Para o vão tem-se uma distância de $13\ m$, sendo esta suficiente para a movimentação e posicionamento dos blocos e também suficiente para a paragem de um camião para que se possa proceder a carga e descarga dos mesmos.

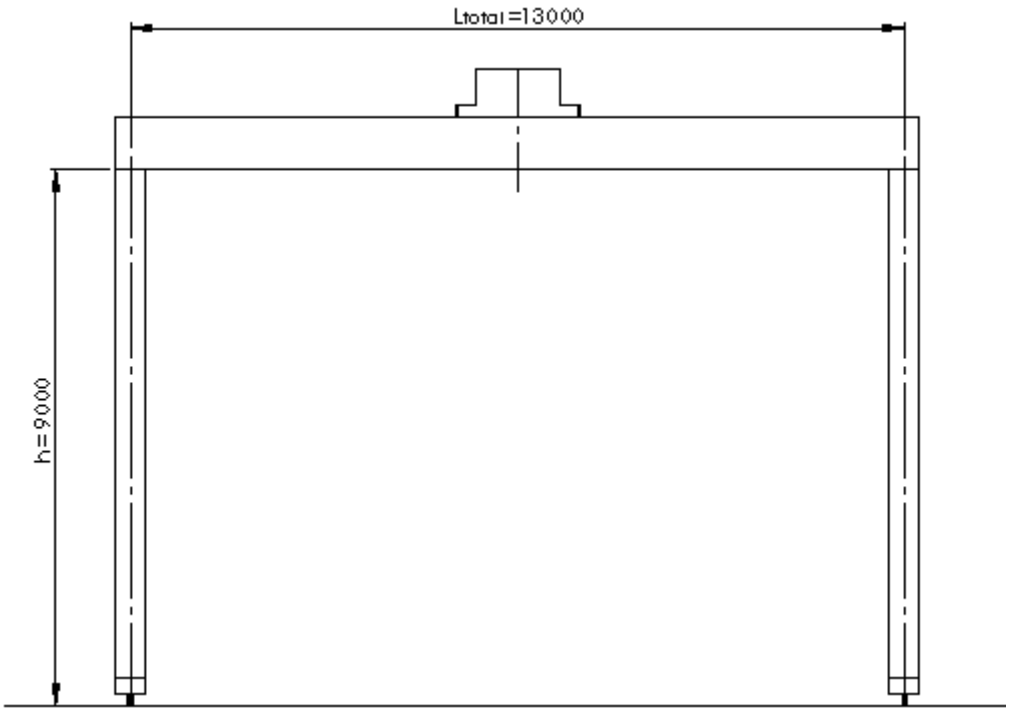


Figura 5.1 – Dimensões do pórtico rolante

A distância entre rodas D_r, já foi anteriormente definida aquando da escolha do carro guincho, relativamente a distância entre eixos das rodas do carro lateral (B), esta foi definida de modo a garantir a estabilidade da ponte, para tal deverão verificar-se as seguintes condições. (anexo 3)

$$B \geq \frac{H}{2{,}5} \Rightarrow 4 \geq \frac{9}{2{,}5} = 3{,}6\,m \qquad e \qquad B \geq \frac{L}{5} \Rightarrow 4 \geq \frac{13}{5} = 2{,}6\,m$$

Condições verificadas.

Nota: Para a garantir a estabilidade, deverá verificar-se também se as reacções nos apoios (rodas) são positivas na direcção vertical, para assim não ser gerado um momento capaz de capotar o pórtico.

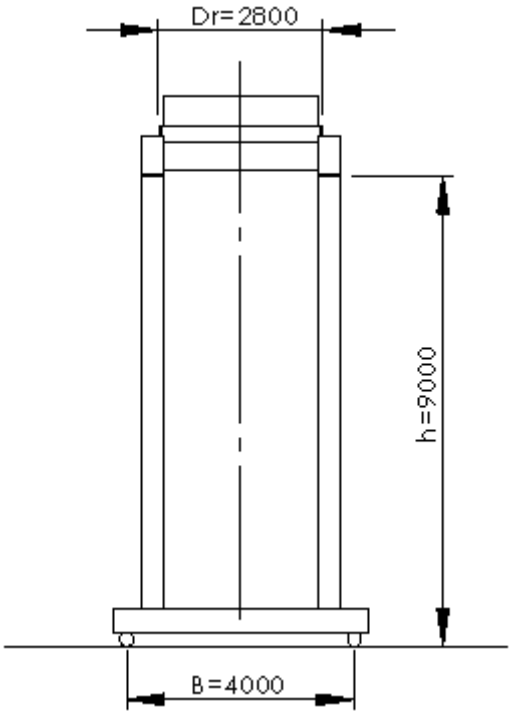


Figura 5.2 - Dimensões do pórtico rolante

5.2. Tipo de ligações entre a viga resistente e os pilares

As ligações entre os pilares e a viga resistente serão idealizadas, como sendo ligações rígidas. No entanto para vãos muito elevados, e pórticos com grande capacidade de carga, ocorrem nas rodas reacções transversais que podem fazer com que as rodas do pórtico descarrilem dos carris.

Para evitar esta situação, de um dos lados do pórtico, as pernas são idealizadas como sendo articuladas a viga resistente, diminuindo assim consideravelmente as reacções horizontais que são transmitidas aos carris. De salientar também, que com esta opção as flechas horizontais e verticais são muito grandes, o que obriga ao uso de perfis com secções elevadas.

Utilizando as ligações todas rígidas, a flecha diminui consideravelmente, no entanto teremos maiores momentos nas ligações viga pilar.

Como para o caso em estudo, não se tem cargas nem vãos muito elevados, optou-se por ligações todas rígidas, entre as pernas e a viga resistente.

5.3. Pré-dimensionamento da estrutura

Com este pré-dimensionamento, pretende-se com poucos cálculos ter uma ideia das secções necessárias para os elementos principais da estrutura pórtico, para assim se efectuar uma análise de esforços através do software *Multiframe*, e com esses esforços poder efectuar uma verificação das secções segundo o EC3.

No pré-dimensionamento, são assumidas algumas simplificações e não é feita qualquer verificação quanto ao risco de enfunamento nas almas e banzos da viga resistente, encurvadura entre outras verificações necessárias que o EC 3 contempla.

- Viga resistente

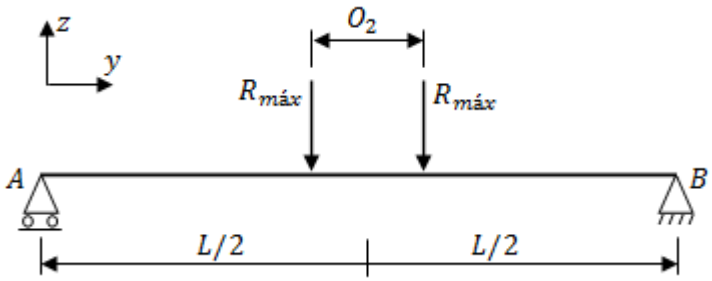


Figura 5.3 – Esquema estático (viga resistente)

O valor de $R_{máx} = 97\ kN$, é a reacção máxima nas rodas do carro guincho, a distância entre apoios é de $13\ m$ e $O_2 = 1{,}5m$, o valor de $R_{máx}$ será majorado com os coeficientes já anteriormente calculados, $\psi = 1{,}15\ e\ \gamma_c = 1{,}08$.

O momento máximo na viga é dado por,

$$M_x = \psi \times \gamma_c \times R_{máx} \times \left(\frac{L - O_2}{2}\right) = 120{,}5 \times \left(\frac{13 - 1{,}5}{2}\right) = 692{,}9\ kN.m$$

Então, o módulo de rigidez elástico necessário vem,

$$W_{el,x} > \frac{M}{\frac{f_y}{1{,}5}} = \frac{1{,}5 \times 692{,}9 \times 10^6}{235} = 4422{,}8 \times 10^3\ mm^3$$

Deve igualmente ser verificada a flecha máxima. Nas estruturas com pontes rolantes a flecha máxima admitida é muito reduzida, quando comparadas com outras estruturas que não possuem pontes rolantes, e como tal vai influenciar o tipo de secção resistente necessária. Sendo assim foi considerado o seguinte esquema estático.

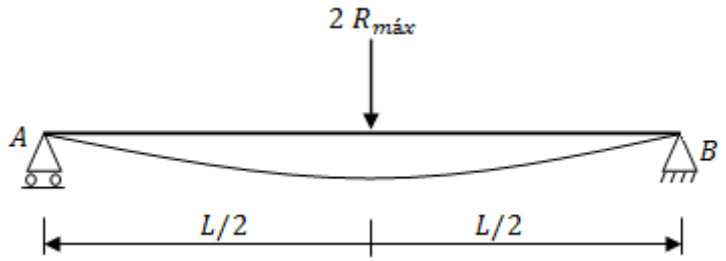


Figura 5.4 – Esquema estático

A flecha máxima vertical admitida é,

$$\delta_V = \frac{L}{800} = \frac{13000}{800} = 16{,}25\ mm$$

Para uma viga simplesmente apoiada, a flecha é dada por,

$$\delta_V = \frac{P \times L^3}{48 \times E \times I_x} = \frac{(\psi \times \gamma_c \times 2 \times R_{máx}) \times L^3}{48 \times E \times I_x} \Rightarrow I_x$$

$$\Rightarrow I_x = \frac{(\psi \times \gamma_c \times 2 \times R_{máx}) \times L^3}{48 \times E \times \delta_V} = \frac{241 \times 10^3 \times 13000^3}{48 \times 210000 \times 16{,}25} =$$

$$I_x = 3232{,}5 \times 10^6\ mm^4$$

No entanto, é de salientar que o momento de inércia obtido é um pouco exagerado na medida em que se considerou uma carga concentrada a meio vão (figura 5.5), o que não corresponde a realidade, pois as reacções $R_{máx}$encontra-se separadas de $1{,}5\ m$ que é a distância entre eixos do carro-guincho ou bitola.

- Pilar rigidamente ligado a viga resistente

Para o pré-dimensionamento do pilar, utilizou-se uma regra prática em que se admite para momento máximo no pilar, 35% do momento máximo na viga resistente, calculado anteriormente. O módulo de resistência elástico para o pilar será dado por,

$$W_{el,x} > \frac{M \times 0{,}35}{\frac{f_y}{1{,}5}} = \frac{1{,}5 \times 692{,}9 \times 10^6 \times 0{,}35}{235} = 1547{,}9 \times 10^3\ mm^3$$

- Carro lateral

Para perfil do carro lateral foi seleccionado uma secção HEB, dada a maior espessura de banzos quando comparados com secções IPE. A maior espessura dos banzos é favorável para a fixação das pernas por ligação aparafusada, e também para a ligação dos blocos de rodas. Sendo assim propõem-se um perfil HEB 360.

5.3.1. Definição das secções com base no Pré-dimensionamento

Com base no pré-dimensionamento efectuado acima, foram geradas secções no software ***SectionMaker***, para posterior análise estrutural no software ***Multiframe3D***, uma vez que este programa não possui secções em caixão.

Para secção da viga resistente será utilizada uma secção em viga caixão. No caso dos pilares e atendendo ao nível dos esforços em causa será possível utilizar uma secção tubular normalizada, SHS. Sempre que possível a utilização de secções normalizadas é preferível à utilização de vigas caixão por questões de custos.

- Viga resistente (Caixão 530×920) S 235

De acordo com o pré-dimensionamento efectuado, para a viga resistente esta deverá possuir, com base nas tensões ($\boldsymbol{w_{el,x}} \geq 4422{,}8 \times 10^3\ mm^3$), com base na flecha máxima ($\boldsymbol{I_x} < 3232{,}5 \times 10^6\ mm^4$), mas como já referido anteriormente este momento de inércia é um pouco exagerado, senso assim, foi gerado um perfil no *Section Maker*, com propriedades intermédias aos valores calculados para I_x e $w_{el,x}$.

Tabela 5.1 – Propriedades da secção

Propriedade	Valor	Unidade
m	180,4	kg/m
d	30	mm
f	60	mm
b	530	mm
h	920	mm
p	65	mm
t_w	7	mm
t_f	8	mm
A	22936	mm^2
I_x	$2999{,}6 \times 10^6$	mm^4
I_z	$751{,}8 \times 10^6$	mm^4
i_x	361,6	mm
i_z	181,1	mm
$w_{el,x\ min}$	$6032{,}1 \times 10^3$	mm^3
$w_{el,z\ min}$	$2681{,}1 \times 10^3$	mm^3

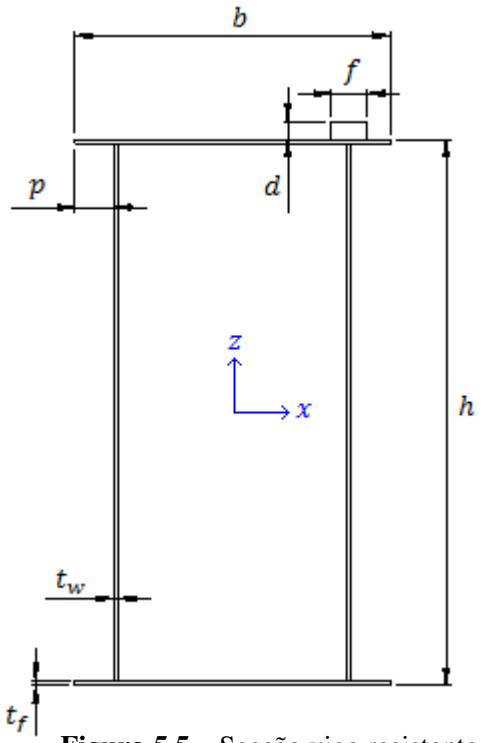


Figura 5.5 – Secção viga resistente

- Pilar (RHS 300×500×8) S 235

De acordo com o pré-dimensionamento: $\boldsymbol{w_{el,x}} \geq 1547{,}9 \times 10^3\ mm^3$

Tabela 5.2 – Propriedades da secção

Propriedade	Valor	Unidade
m	97,9	kg/m
b	300	mm
h	500	mm
t	8	mm
A	12500	mm^2
I_x	$437{,}3 \times 10^6$	mm^4
I_y	$199{,}5 \times 10^6$	mm^4
i_x	187	mm
i_y	126	mm
$w_{el,x}$	1749×10^3	mm^3
$w_{el,y}$	1330×10^3	mm^3

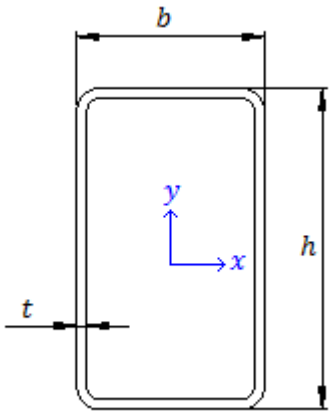


Figura 5.6 – Secção RHS

- Carro (HEB 360) S 235

Tabela 5.3 – Propriedades da secção

Propriedade	Valor	Unidade
m	142	kg/m
b	300	mm
h	360	mm
d	261	mm
t_w	12,5	mm
t_f	22,5	mm
A	18060	mm^2
I_y	$431{,}9 \times 10^6$	mm^4
I_z	$101{,}4 \times 10^6$	mm^4
i_y	154,6	mm
i_z	74,9	mm
$w_{el,y}$	2400×10^3	mm^3
$w_{el,z}$	$676{,}1 \times 10^3$	mm^3

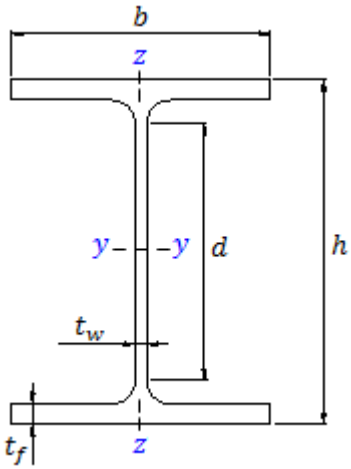


Figura 5.7 – Secção HEB

Cálculo das forças de inércia devido ao movimento de arranque e paragem do pórtico rolante

Efectuado o pré-dimensionamento do pórtico é possível calcular as forças de inércia para uma aceleração do pórtico de $a_m = 0{,}19\ m/s^2$. Dada a diferença de secções entre a viga resistente e os pilares serão calculadas forças de inércia diferentes para os dois casos. Estas forças de inércia serão aplicadas, como uniformemente distribuídas por cada elemento do pórtico (vigas resistentes e pilares).

Para o caso da carga nominal, e carro-guincho as forças de inércia serão aplicadas às rodas, pois este conjunto desloca-se para qualquer posição da viga resistente. Nos carros laterais será aplicada segundo o seu eixo.

Os restantes elementos que compõem o pórtico não serão considerados pois, a massa destes é insignificante, quando comparada com a massa dos pilares ou da viga resistente.

Cálculo do coeficiente ψ_h

Massa equivalente

A massa equivalente corresponde as massas submetidas ao mesmo movimento linear, neste caso, movimento longitudinal do pórtico, com excepção da carga nominal de elevação.

O carro-guincho tem uma massa de $m_c = 3320\ kg$, a viga resistente $m_{vr} = 180{,}4\ kg/m$, o pilar $m_p = 97{,}9\ kg/m$, o carro lateral $m_{cl} = 142\ kg/m$, a carga nominal tem uma massa de $m_{cn} = 32000\ kg$.

Então e de acordo com as dimensões definidas anteriormente tem-se,

$$m_{eq} = m_c + 2 \times 13 \times m_{vr} + 4 \times 9 \times m_p + 2 \times m_{cl}$$

$$m_{eq} = 3320 + 2 \times 13 \times 180{,}4 + 4 \times 9 \times 97{,}9 + 2 \times 4 \times 142 =$$

$$= 12671\ kg$$

Cálculo do μ

$$\mu = \frac{m_1}{m_{eq}} = \frac{32000}{12671} = 2{,}5$$

Como $\mu >$ 1, o valor do coeficiente ψ_h é dado e segundo as normas F.E.M por,

$$\psi_h = [2 + \mu + (1/\mu)]^{0.5} = [2 + 2{,}5 + (1/2{,}5)]^{0.5} = 2{,}2$$

Uma vez definido o coeficiente ψ_h, está-se então em condições de calcular as forças de inércia, devidas ao movimento pórtico.

- Carro-Guincho e Carga Nominal

O carro-guincho tem uma massa de $m_c = 3320\ kg$, a carga nominal tem uma massa de $m_{cn} = 32000\ kg$.

Cálculo da força de Inércia F_{E1}

A força de inércia será igual ao produto da massa pela aceleração (ou desaceleração) resultante do movimento de arranque ou paragem do pórtico, e é dada por,

$$F_{E1} = \psi_h \times (m_c + m_{cn}) \times a_m$$

$$F_{E1} = 2{,}2 \times (3320 + 32000) \times 0{,}19 = 14{,}8\ kN$$

Esta força de inércia, será distribuída pelas 4 rodas do carro guincho.

$$F_{E1,por\ roda} = \frac{14{,}8}{4} = 3{,}7\ kN$$

- Viga resistente

De acordo com o pré-dimensionamento efectuado, tem-se que a massa da viga resistente è $m_{vr} = 180{,}4\ kg/m$.

Cálculo da força de Inércia F_{E2}

$$F_{E2} = \psi_h \times m_{vr} \times a_m$$

$$F_{E2} = 2{,}2 \times (13 \times 180{,}4) \times 0{,}19 = 980{,}3\ N$$

Como já foi referido a força de inércia será assumida, como sendo uniformemente distribuída pela viga resistente então,

$$F_{E2,por\ metro} = \frac{F_{E1}}{L_{viga}} = \frac{980{,}3}{13} = 75{,}4\ N/m$$

- Pilar

De acordo com o pré-dimensionamento efectuado, tem-se que a massa do pilar è $m_p = 97{,}9\ kg/m$.

Cálculo da força de Inércia F_{E3}

$$F_{E3} = \psi_h \times m_p \times a_m$$
$$F_{E3} = 2{,}2 \times (9 \times 97{,}9) \times 0{,}19 = 368{,}3\ N$$

Como já foi referido a força de inércia será assumida, como sendo uniformemente distribuída pelo pilar,

$$F_{E3,por\ metro} = \frac{F_{E2}}{L_{pilar}} = \frac{368{,}3}{9} = 40{,}9\ N/m$$

- Carro lateral

Como foi dito anteriormente foi assumido, um HEB 360 para perfil do carro lateral. Este perfil tem uma massa de $m_{cl} = 142\ kg/m$

Cálculo da força de Inércia F_{E4}

$$F_{E4} = \psi_h \times m_{cl} \times a_m$$

$$F_{E4} = 2{,}2 \times (4 \times 142) \times 0{,}19 = 237{,}4\ N$$

Cálculo da força do vento

Uma vez feito o pré-dimensionamento da estrutura, é possível calcular a força do vento sobre a estrutura pois já são conhecidas as áreas de cada elemento (pilares e viga resistente). Esta força depende da área total de cada elemento, sendo a aplicação desta no pórtico efectuada como uma força uniformemente distribuída.

- Viga resistente

De acordo com o pré-dimensionamento efectuado, tem-se uma secção em caixão de $530 \times 920\ mm$.

- A força do vento (1º pórtico) é dada por,

$$F_1 = A \times q \times Cf$$
$$F_1 = (13000 \times 920 \times 10^{-6}) \times 250 \times 1{,}8 = 5{,}4\ kN$$

Onde, A é a área exposta ao vento, q é a pressão do vento e Cf o coeficiente de forma, este factor é dado pela tabela 4.5, em função de $l/b = 13000/920 = 14{,}1$ e $b/d = 920/530 = 1{,}7$, resultando assim $Cf = 1{,}8$.

- A força do vento (2º pórtico) é dada por,

$$F_2 = \eta \times A \times q \times Cf$$
$$F_2 = 0{,}33 \times (13000 \times 920 \times 10^{-6}) \times 250 \times 1{,}8 = 1{,}8\ kN$$

Onde, η é o coeficiente de blindagem, e é dado pela tabela 4.6, em função de $a/b = 2800/920 = 3{,}04$ e $A/A_e = 1$, resultando $\eta = 0{,}33$.

Para a força ser uniformemente distribuída basta dividir pelo comprimento da viga resistente,

$$F_{1,por\ metro} = \frac{F_1}{13} = \frac{5{,}4}{13} = 0{,}41\ kN/m$$
$$F_{2,por\ metro} = \frac{F_2}{13} = \frac{1{,}8}{13} = 0{,}14\ kN/m$$

- Pilar

De acordo com o pré-dimensionamento efectuado, tem-se uma secção tubular de $500 \times 300\ mm$.

- A força do vento (1º pórtico) é dada por,

$$F_1 = A \times q \times Cf$$
$$F_1 = (9000 \times 500 \times 10^{-6}) \times 250 \times 1{,}9 = 2{,}1\ kN$$

Onde, A é a área exposta ao vento, q é a pressão do vento e Cf o coeficiente de forma, este factor é dado pela tabela 4.5, em função de $l/b = 9000/500 = 18$ e $b/d = 500/300 = 1{,}7$, resultando assim $Cf = 1{,}9$.

- A força do vento (2º pórtico) é dada por,

$$F_2 = \eta \times A \times q \times Cf$$
$$F_2 = 0{,}87 \times (9000 \times 500 \times 10^{-6}) \times 250 \times 1{,}9 = 1{,}9\ kN$$

Onde, η é o coeficiente de blindagem, e dado pela tabela 4.6, em função de $a/b = 2800/500 = 5{,}6$ e $A/A_e = 1$, resultando $\eta = 0{,}87$.

Para a força ser uniformemente distribuída basta dividir pelo comprimento do pilar,

$$F_{1,por\ metro} = \frac{F_1}{9} = \frac{2{,}1}{9} = 0{,}23\ kN/m$$
$$F_{2,por\ metro} = \frac{F_2}{9} = \frac{1{,}9}{9} = 0{,}21\ kN/m$$

5.4. Definição do esquema estático de toda a estrutura

Uma vez definidas todas as solicitações sobre estrutura, está-se em condições de definir o esquema estático geral sobre o pórtico, para posterior análise de esforços (Momentos, Esforços Normais, Esforços Transversos e Momentos Torsores) no software ***Multiframe 3D***. (Nota: Todas as cargas horizontais foram consideradas no sentido contrario ao eixo x, este sistema de eixo será utilizado ao longo do trabalho)

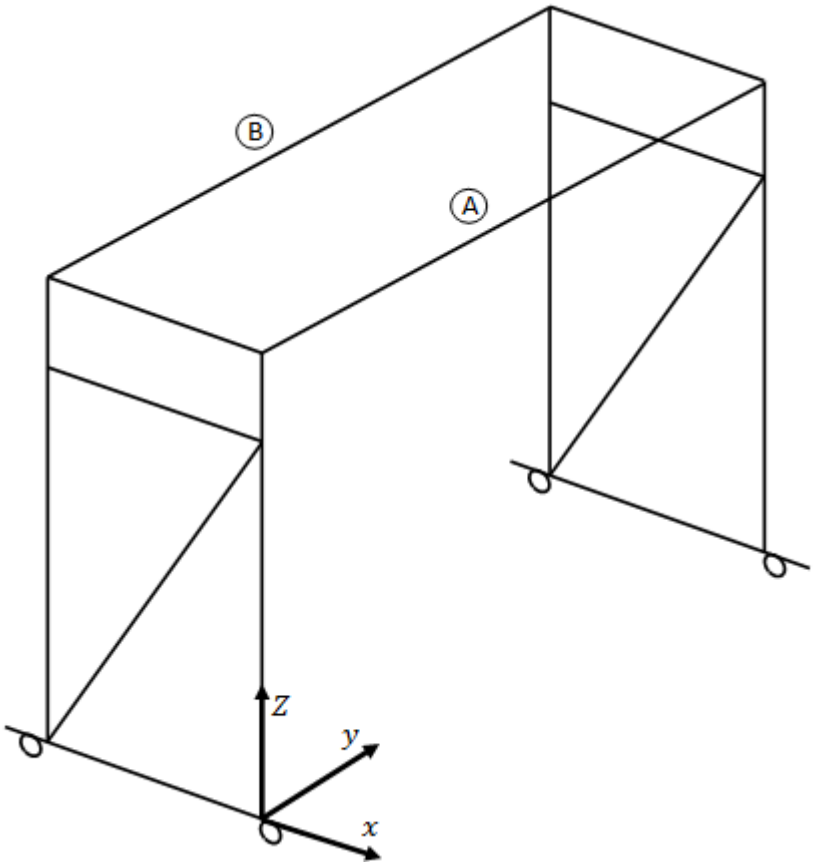


Figura 5.8 – Pórtico Rolante

De acordo com o sistema de eixos acima, serão definidas de seguida todas as solicitações sobre a estrutura, anteriormente calculadas.

a) Peso próprio da estrutura;
b) Solicitações devidas aos movimentos verticais;
c) Solicitações devidas aos movimentos horizontais;
d) Solicitações originadas pelos efeitos climáticos;

As solicitações serão majoradas de acordo com:

$$\gamma_c(S_G + \psi \times S_L + S_H) + S_w$$

Onde, S_G representa peso próprio da estrutura, S_L a carga de serviço, S_H solicitações horizontais, e por fim as solicitações devidas ao vento S_W. Com $\gamma_c = 1{,}08$ e $\psi = 1{,}15$ que são os coeficientes de majoração.

a) Peso próprio da estrutura - S_G

O peso próprio da estrutura é considerado no cálculo dos esforços, como uma carga uniformemente distribuída.

Foi considerado também, uma carga uniformemente distribuída sobre a viga resistente de cerca de $250\,N/m$, relativa ao peso das nervuras de rigidez ou septos, varandim e cabos eléctricos.

b) Solicitações devidas aos movimentos verticais - S_L

<u>Carga nominal</u> Solicitação na direcção z-z

Estas solicitações são consideradas, nas 4 Rodas do Carro-Guincho.

Pórtico A

$R_{VA} = 1{,}08 \times 1{,}15 \times 97 = 120{,}5\ kN$

Pórtico B

$R_{VB} = 1{,}08 \times 1{,}15 \times 93{,}7 = 116{,}4\ kN$

c) Solicitações devidas aos movimentos horizontais - S_H

<u>Forças transversais provocadas pelo rolamento</u> Solicitação na direcção x-x

Estas solicitações são consideradas, nas 4 Rodas do Carro-Guincho.

Pórtico A

$F_{TA} = 1{,}08 \times 4{,}9 = 5{,}3\ kN$

Pórtico B

$F_{TB} = 1{,}08 \times 4{,}7 = 5{,}1\ kN$

<u>Força de Inércia – Mov. Carro</u> Solicitação na direcção y-y

Estas solicitações são consideradas, nas Rodas do Carro-Guincho (não são aplicadas nas 4 rodas do carro, apenas numa roda de cada pórtico).

Pórtico A e B

$F_{IA,B} = 1{,}08 \times 5{,}4 = 5{,}8\ kN$

<u>Força de Inércia – Mov. Pórtico (Carro e Carga)</u> Solicitação na direcção x-x

Estas solicitações são consideradas, nas 4 Rodas do Carro-Guincho.

Pórtico A e B

$F_{IA,B} = 1{,}08 \times 3{,}7 = 4\ kN$

<u>Força de Inércia – Mov.Pórtico (Viga Resistente)</u> Solicitação na direcção x-x

Estas solicitações são consideradas, uniformemente distribuídas pela Viga Resistente.

Pórtico A e B

$F_{IA,B} = 1{,}08 \times 75{,}4 = 81{,}4\ N/m$

<u>Força de Inércia – Mov.Pórtico (Pilar)</u> Solicitação na direcção x-x

Estas solicitações são consideradas, uniformemente distribuídas pelo pilar.

Pórtico A e B

$F_{IA,B} = 1{,}08 \times 40{,}9 = 44{,}2\ N/m$

<u>Força de Inércia – Pórtico (Carro Lateral)</u> Solicitação na direcção x-x

Estas solicitações são consideradas, nos carros laterais.

$F_{IA} = 1{,}08 \times 237{,}4 = 256{,}4\ N$

d) Solicitações originadas pelos efeitos climáticos - S_w

<u>Força do vento – Viga Resistente</u> Solicitação na direcção x-x

Estas solicitações são consideradas, uniformemente distribuídas pela Viga Resistente.

Pórtico A

$F_{VA} = 0{,}41 + 0{,}13 = 0{,}54\ kN/m$

Pórtico B

$F_{VB} = 0{,}14\ kN/m$

<u>Força do vento – Pilar</u> Solicitação na direcção x-x

Estas solicitações são consideradas uniformemente distribuídas pelo Pilar.

Pórtico A

$F_{VA} = 0{,}23 + 0{,}13 = 0{,}36\ kN/m$

Pórtico B

$F_{VB} = 0{,}21\ kN/m$

<u>Momento Torsor originado pela excentricidade da carga</u>

No software de análise estrutural *Multiframe*, só é permitido aplicar cargas no centro das secções, mas no caso das cargas verticais sobre a viga resistente, isso conduz a um erro, pois estas cargas são aplicadas sobre os carris e estes encontram-se descentrados do eixo da secção da viga.

Por este motivo, essa reacção excêntrica será substituída por uma de igual valor mais um momento torsor correspondente a excentricidade, aplicadas no centro da secção, como de resto se mostra na figura abaixo.

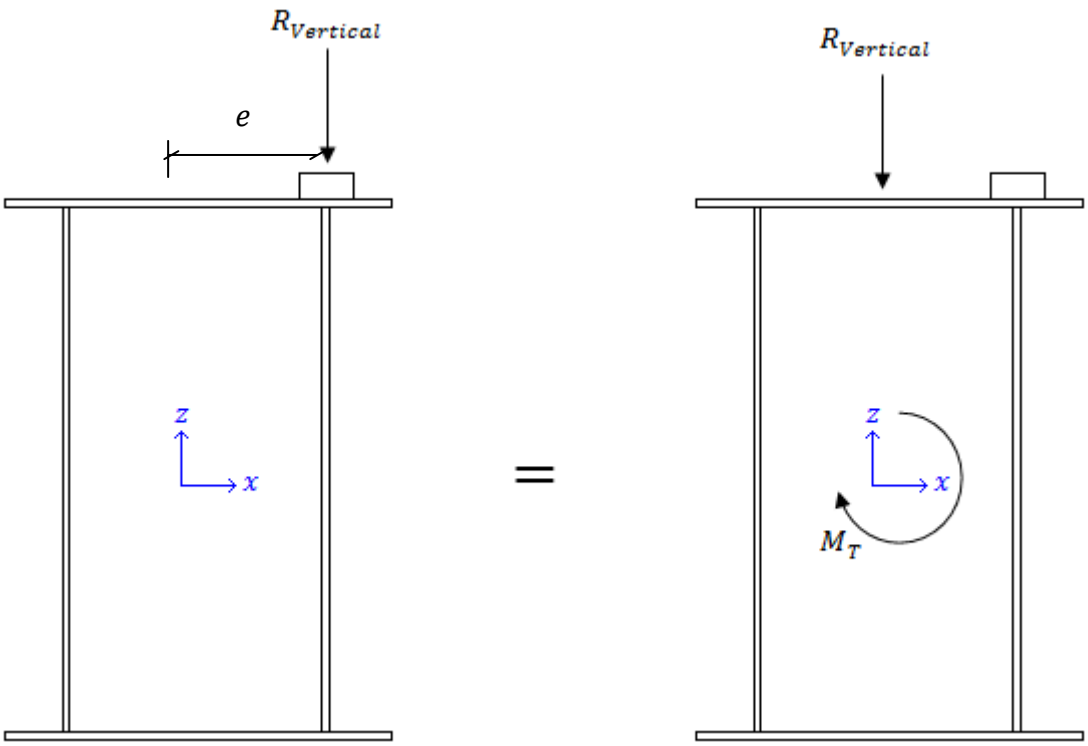


Figura 5.9 – Excentricidade das reacções verticais do carro-guincho

A secção em caixão tem uma secção de $b = 530 \times h = 920\ mm$.

Pórtico A

$M_{TA} = e \times R_{VA} = 196{,}5 \times 10^{-3} \times 120{,}5 = 23{,}7\ kN.m$

Valor por roda.

Pórtico B

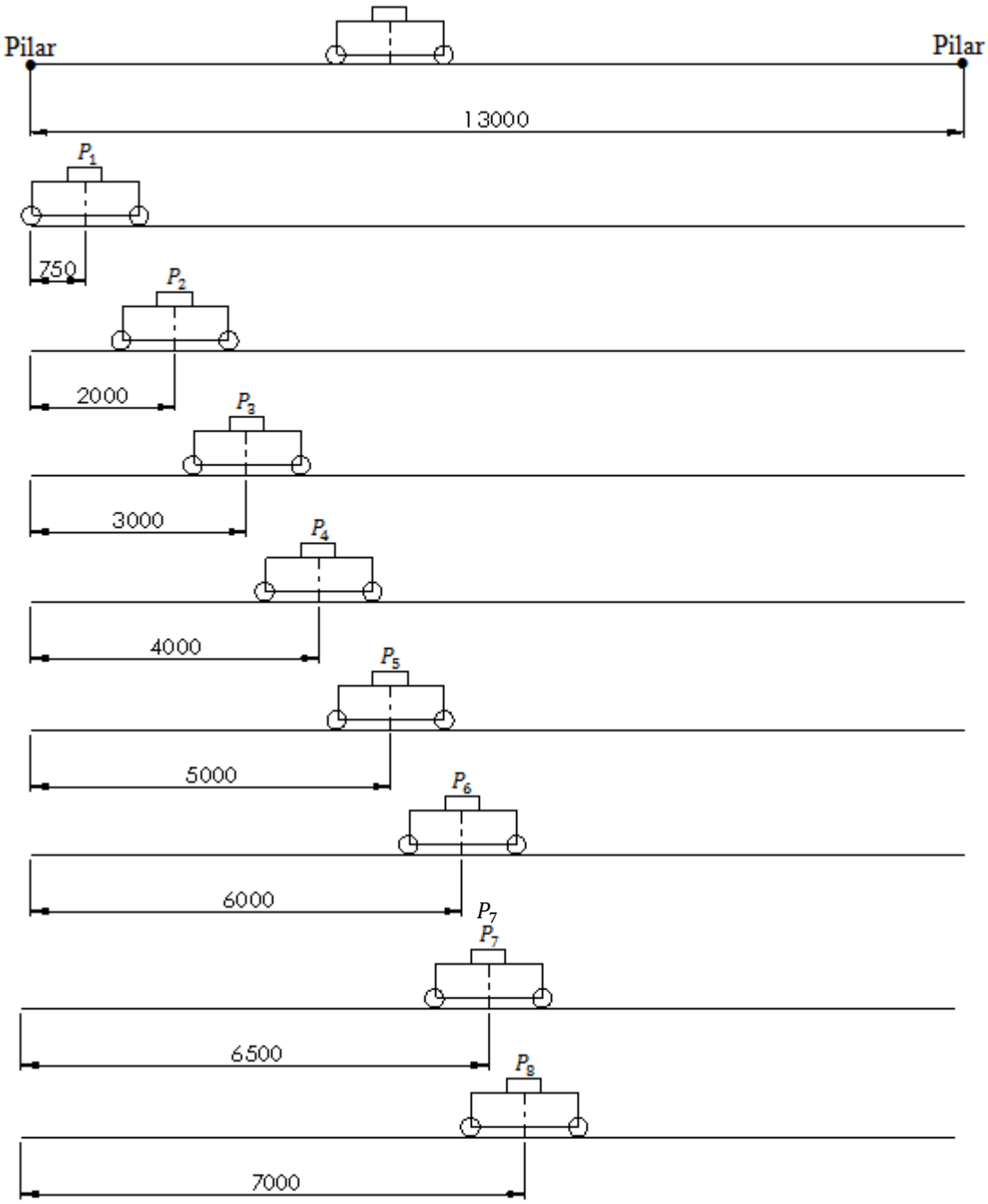
$M_{TB} = e \times R_{VB} = 196{,}5 \times 10^{-3} \times 116{,}4 = 22{,}9\ kN.m$

Valor por roda.

5.5. Análise de esforços da estrutura

De acordo com as solicitações anteriormente definidas, e com secções obtidas do pré-dimensionamento, será efectuada uma análise de esforços no software ***Multiframe 3D***, para posterior verificação das secções segundo o EC 3. O carro-guincho pode estar em qualquer posição sobre a viga resistente, gerando assim diferentes esforços sobre a estrutura pórtico, para tal consideraram-se sucessivas posições do carro (1 em 1 m), para assim se poder definir qual a situação mais crítica.

Posições do carro guincho



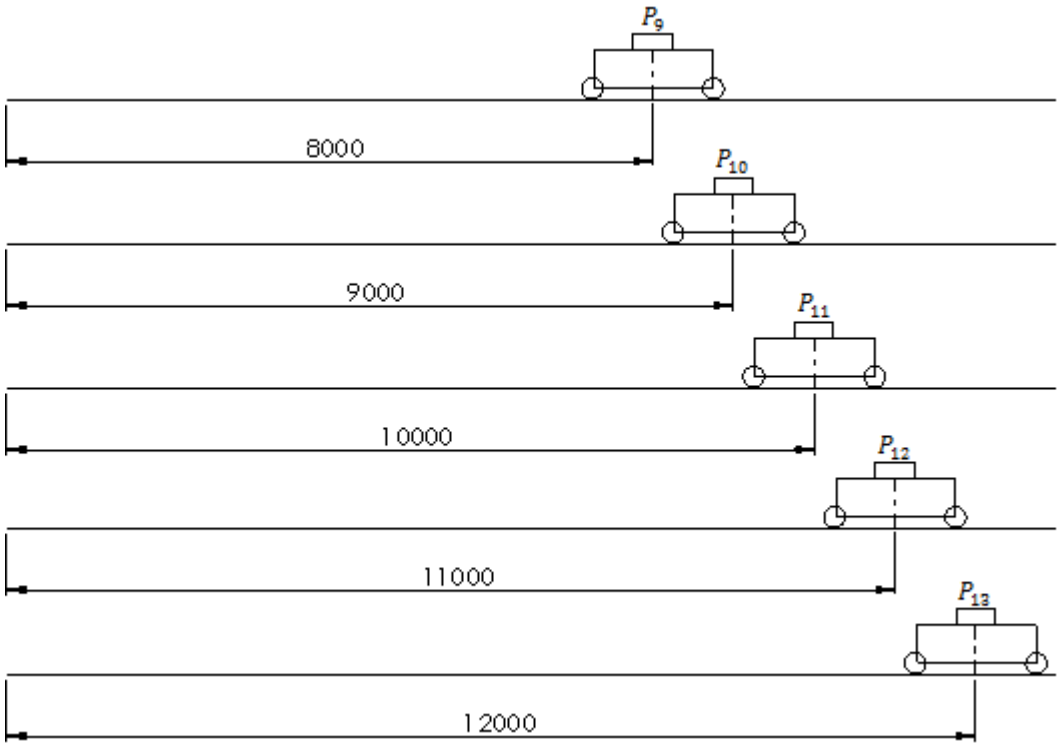


Figura 5.10 – Posições sucessivas do Carro - Guincho

Para identificação dos elementos, bem como dos pontos críticos é usada a notação apresentada na figura abaixo. Os pontos numerados com (9,10,11 e 12), referem-se as rodas do carro-guincho e como tal são pontos que irão "percorrer" a viga resistente, de acordo com as posições sucessivas atrás definidas.

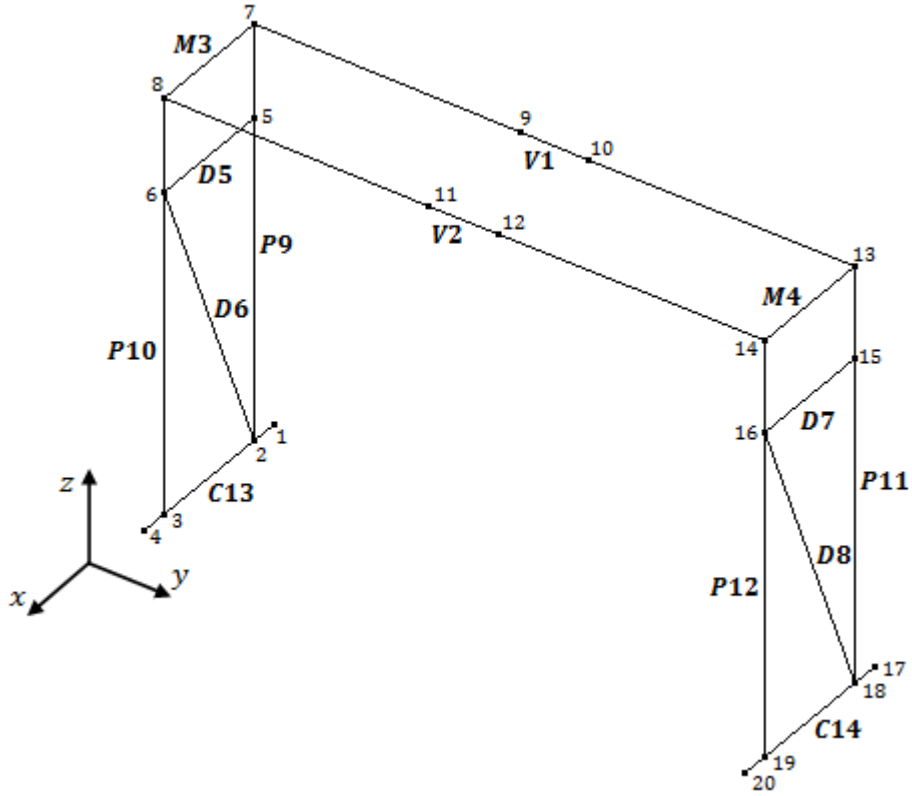


Figura 5.11 – Pórtico rolante/identificação dos elementos estruturais

Restrições nas ligações ao exterior:

De acordo com a figura acima, tem-se as rodas dos carros laterais aplicadas nos nós $1,4,17\ e\ 20$. Tendo em conta o sistema de eixos da figura, definiram-se as seguintes restrições para os deslocamentos e rotações das rodas, que são os apoios ao exterior da estrutura pórtico.

Apoio $1\ e\ 17$

Deslocamentos – Restringidos segundo x, y, z

Rotações – Livres segundo x, y, z

Apoio $4\ e\ 20$

Deslocamentos – Restringidos segundo x, y, z

Rotações – Livres segundo x, y, z

Nota: Foram aplicados motores nas quatro rodas.

<u>Análise de esforços na estrutura - Esforços e Diagrama de Esforços</u>

Esforços – Carro-Guincho na posição P_1

Tabela 5.4 – Esforços máximos instalados na estrutura, para a posição do carro P_1

	Pontos Críticos	N_{sd} $[kN]$	$V_{sd.x-y}$ $[kN]$	$V_{sd.x-z}$ $[kN]$	$V_{sd.y-z}$ $[kN]$	$M_{sd.x}$ $[kN.m]$	$M_{sd.y}$ $[kN.m]$	$M_{sd.z}$ $[kN.m]$
$V2$	12	6,7 (C)	$-11,1$	-	113,8	$-170,3$	20,9	16,5
$M3$	8	17,1 (C)	0,6	$-12,2$	-	0	$-19,7$	0,8
$D5$	5	31,9	-	-	-	-	-	-
$D6$	2	127,9 (C)	-	-	-	-	-	-
$P9$	7	242,2 (C)	-	$-35,2$	0,3	$-2,4$	58,7	0,8
$P11$	13	35,3 (C)	-	$-4,2$	6,1	$-54,7$	6,6	3,7
$C13$	2	43,8 (C)	$-0,4$	-339	-	0	$-203,6$	$-0,2$

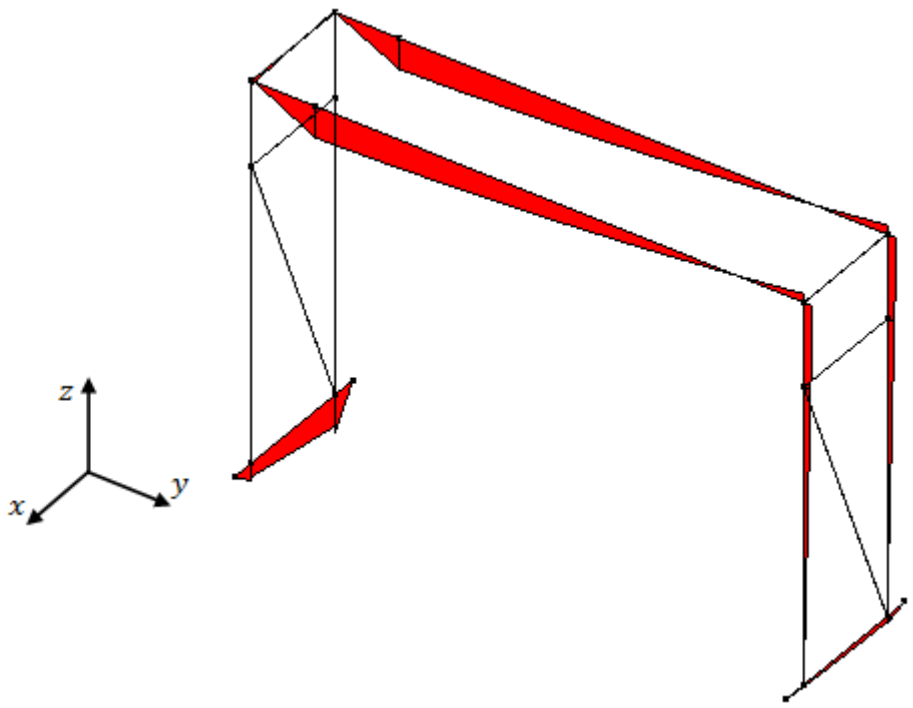


Figura 5.12 – Diagrama de momentos

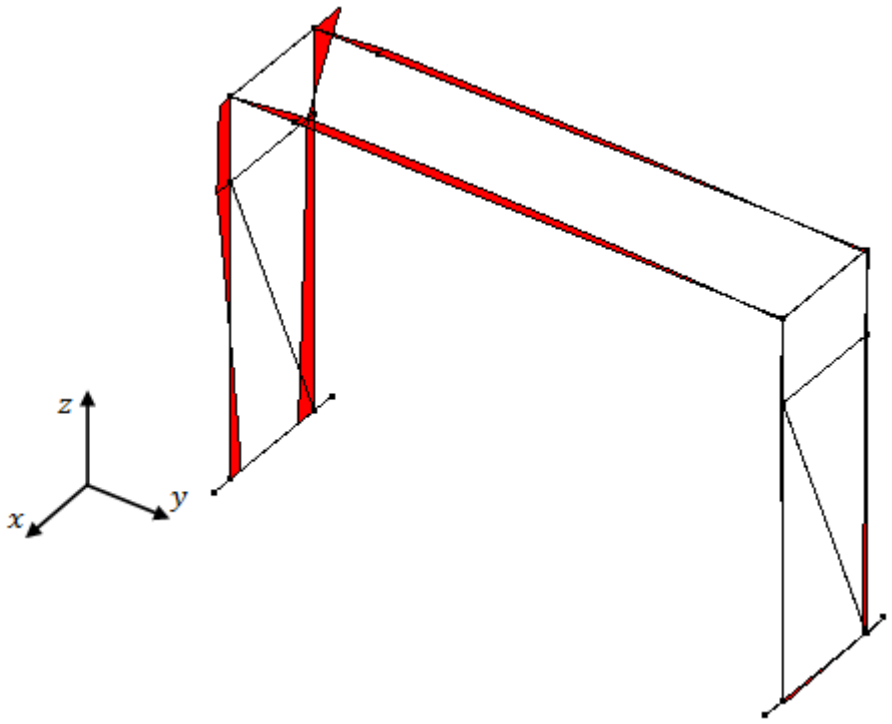


Figura 5.13 – Diagrama de momentos

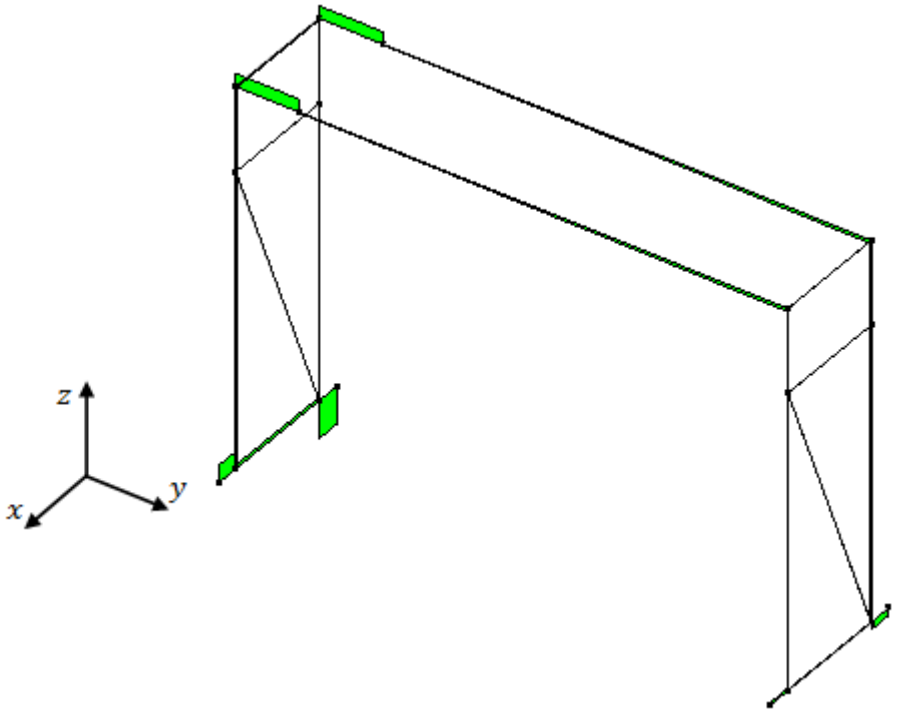


Figura 5.14 – Esforços transversos

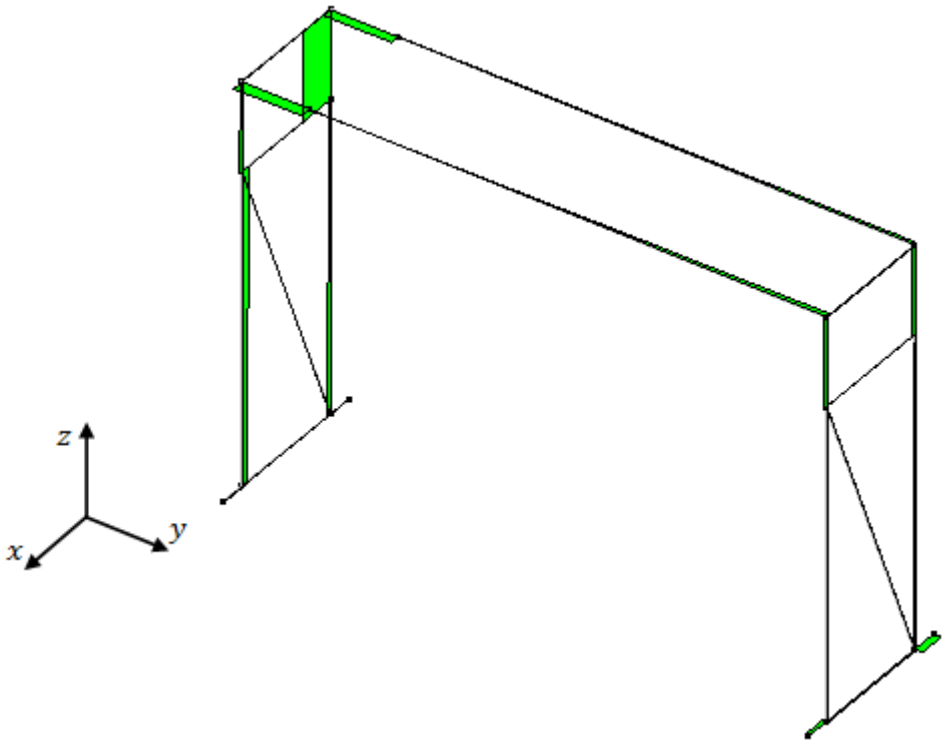


Figura 5.15 – Esforços transversos

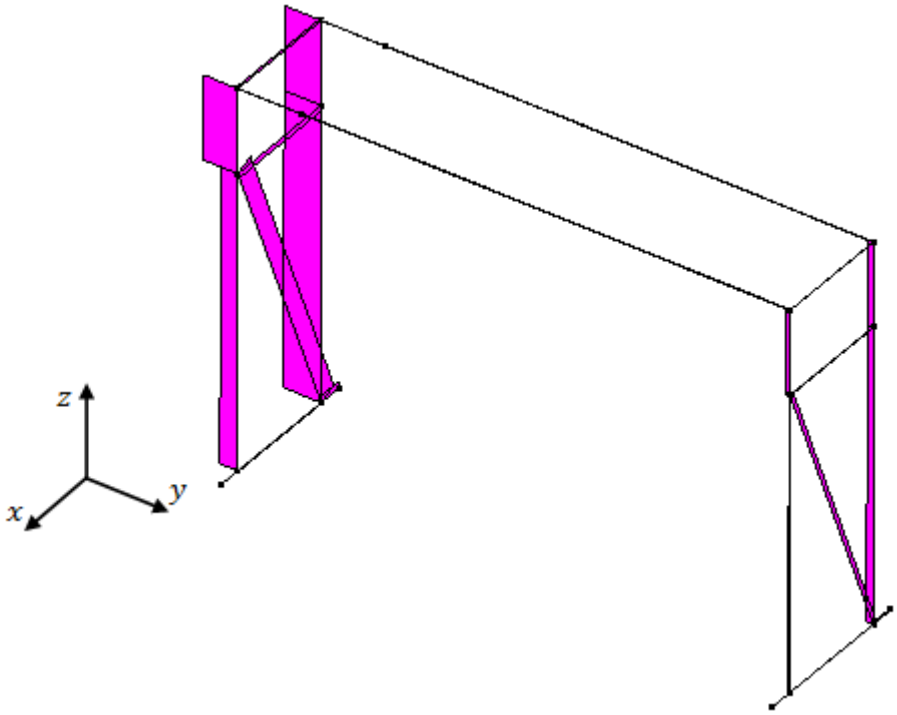


Figura 5.16 – Esforço Normal

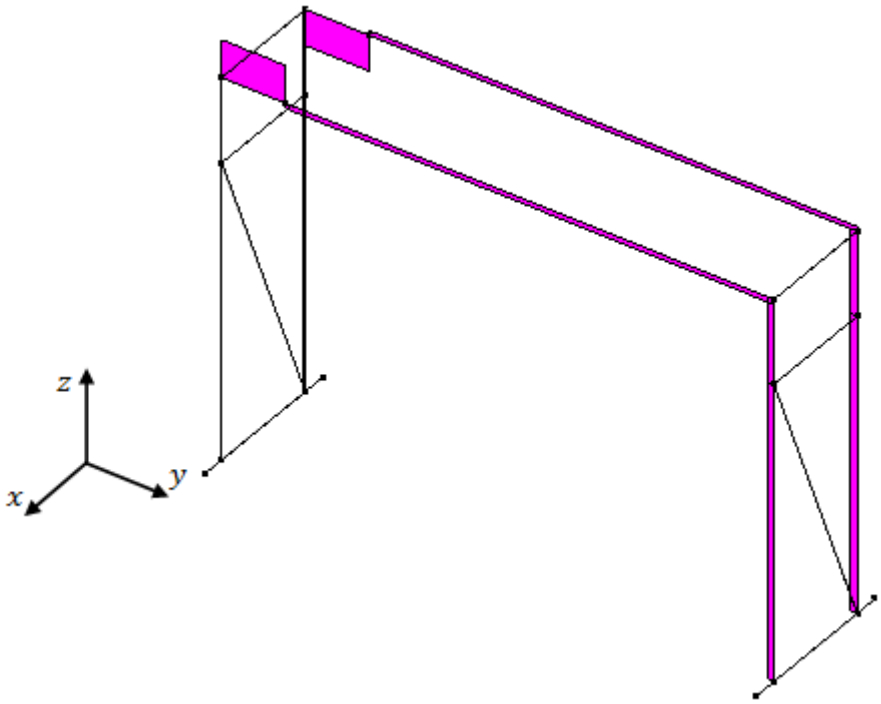


Figura 5.17 – Torção

Esforços – Carro-Guincho na posição P_2

Tabela 5.5 – Esforços máximos instalados na estrutura, para a posição do carro P_2

	Pontos Críticos	N_{sd} $[kN]$	$V_{sd.x-y}$ $[kN]$	$V_{sd.x-z}$ $[kN]$	$V_{sd.y-z}$ $[kN]$	$M_{sd.x}$ $[kN.m]$	$M_{sd.y}$ $[kN.m]$	$M_{sd.z}$ $[kN.m]$
$V2$	11	4,6 (C)	$-18,8$	-	211,6	$-232,8$	40,2	20,8
$M3$	8	15,4 (C)	1,2	$-11,2$	-	0	$-18,1$	1,8
$D5$	5	29	-	-	-	-	-	-
$D6$	2	117,9 (C)	-	-	-	-	-	-
$P9$	7	218,8 (C)	-	$-31,6$	$-3,9$	26,2	53,1	$-1,3$
$P11$	13	58,6 (C)	-	$-7,4$	9,1	$-81,9$	12,2	4,4
$C13$	2	40,4 (C)	3,7	$-308,9$	-	0	$-185,6$	2,2

Esforços – Carro-Guincho na posição P_7

Tabela 5.6 – Esforços máximos instalados na estrutura, para a posição do carro P_7

	Pontos Críticos	N_{sd} $[kN]$	$V_{sd.x-y}$ $[kN]$	$V_{sd.x-z}$ $[kN]$	$V_{sd.y-z}$ $[kN]$	$M_{sd.x}$ $[kN.m]$	$M_{sd.y}$ $[kN.m]$	$M_{sd.z}$ $[kN.m]$
$V2$	11	16,5 (C)	$-9,8$	-	118,1	$-640,1$	23,7	59,5
$M4$	14	8,9 (C)	$-2,3$	$-7,3$	-	0	$-11,9$	$-3,4$
$D5$	5	18,3	-	-	-	-	-	-
$D6$	2	80,6 (C)	-	-	-	-	-	-
$P11$	13	142,7 (C)	-	$-19,6$	13,8	$-124,3$	32,7	5,5
$C14$	18	28,1 (C)	$-16,1$	$-209,4$	-	0	$-125,4$	$-9,6$

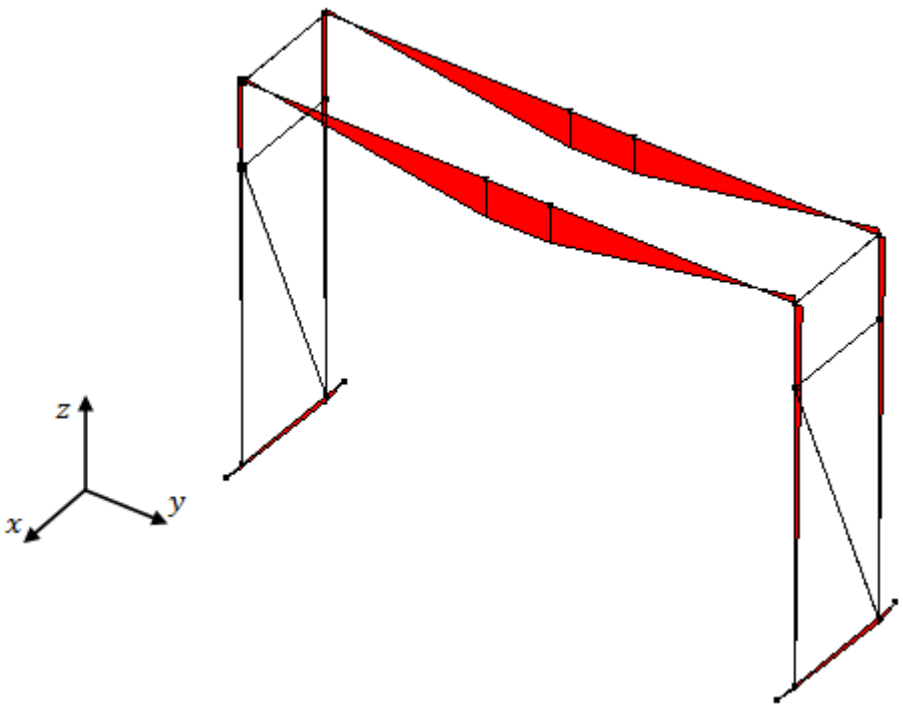


Figura 5.18 – Diagrama de momentos

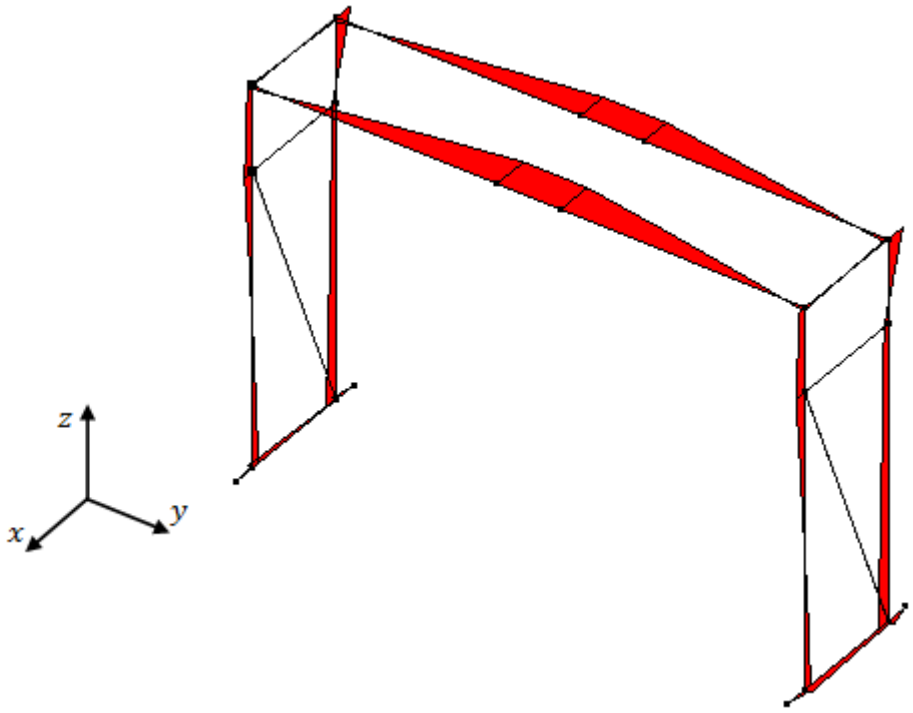


Figura 5.19 – Diagrama de momentos

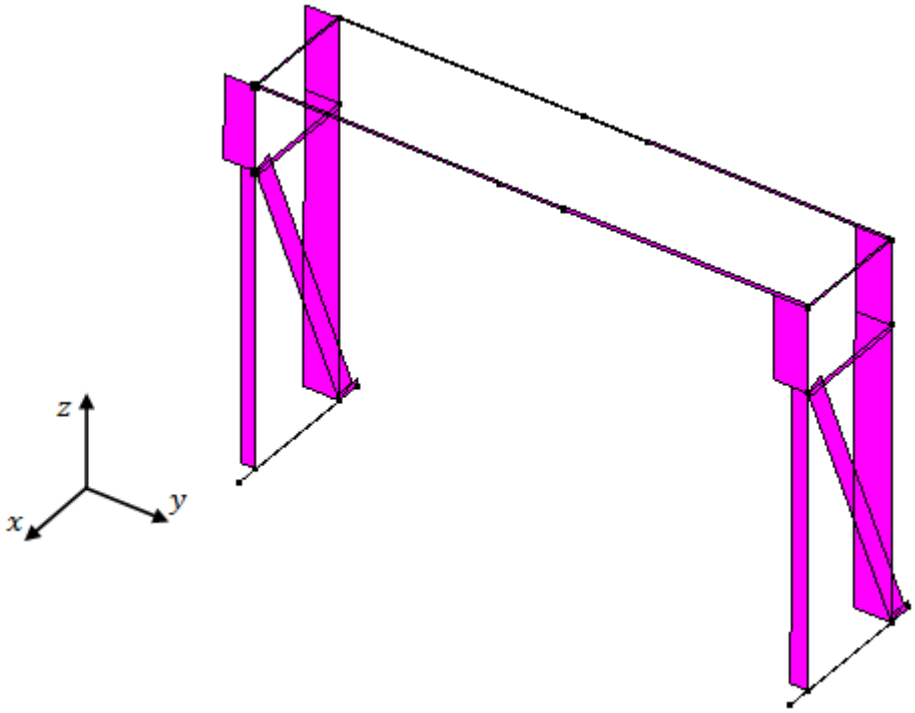


Figura 5.20 – Esforços Normais

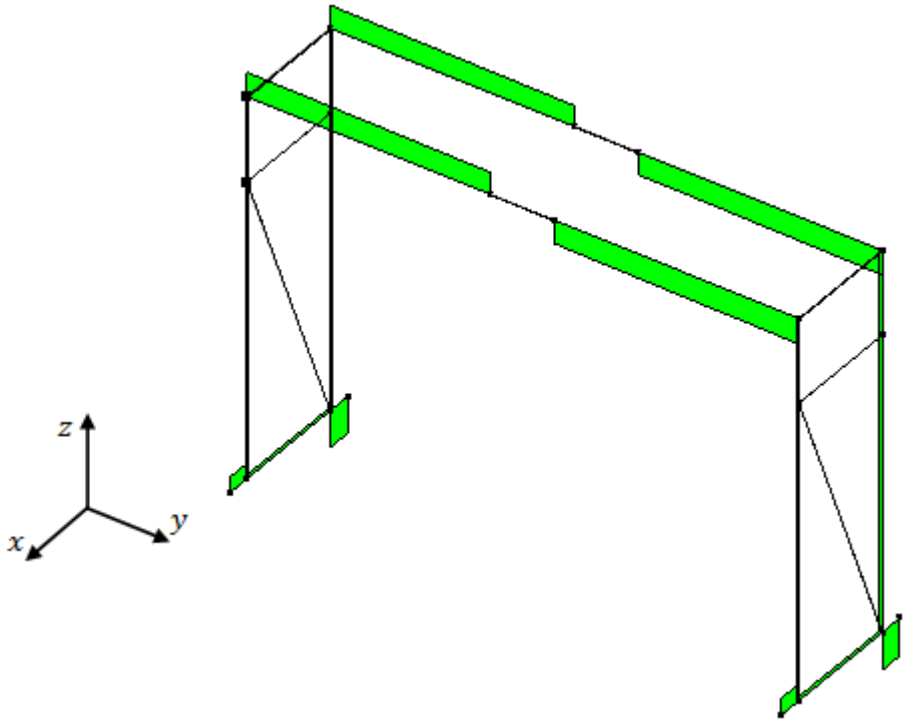


Figura 5.21 – Esforços transversos

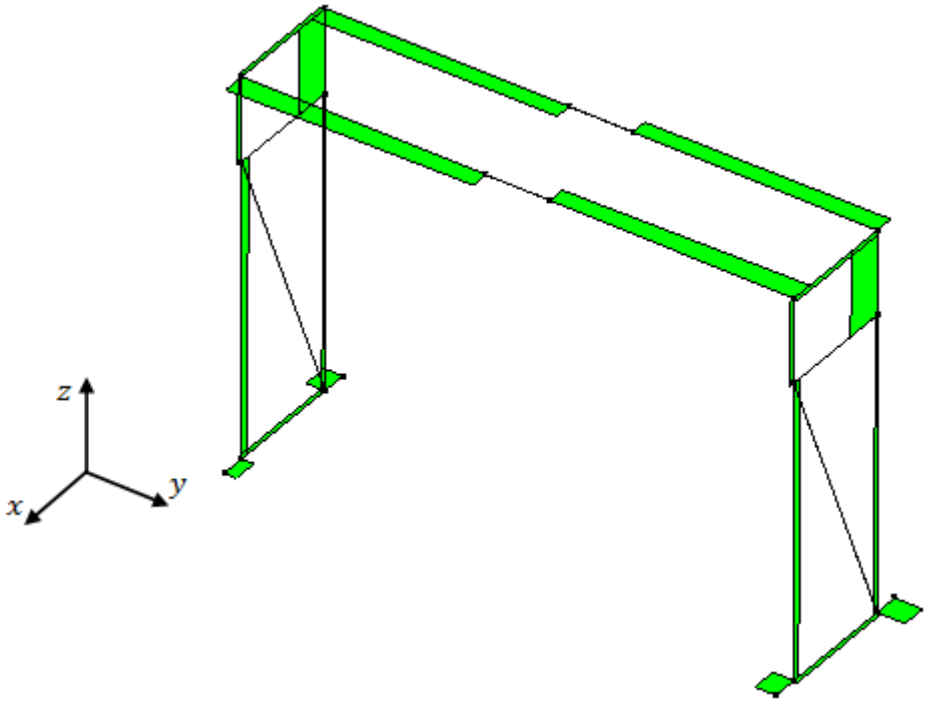


Figura 5.22 – Esforços transversos

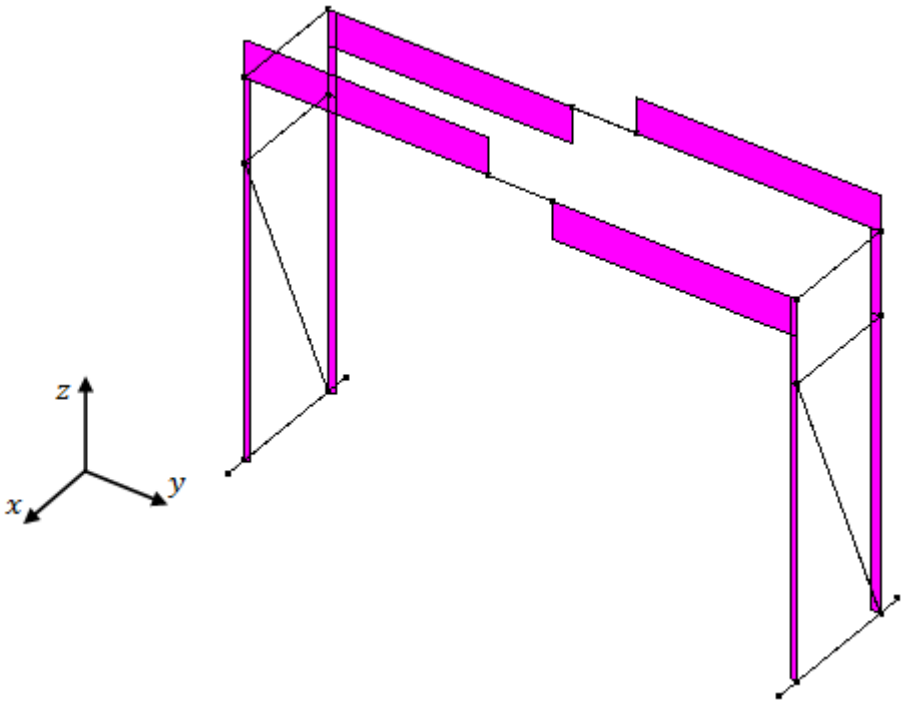


Figura 5.23 – Torção

Esforços – Carro-Guincho na posição P_{10}

Tabela 5.7 – Esforços máximos instalados na estrutura, para a posição do carro P_{10}

	Pontos Críticos	N_{sd} $[kN]$	$V_{sd.x-y}$ $[kN]$	$V_{sd.x-z}$ $[kN]$	$V_{sd.y-z}$ $[kN]$	$M_{sd.x}$ $[kN.m]$	$M_{sd.y}$ $[kN.m]$	$M_{sd.z}$ $[kN.m]$
$V2$	12	13,8 (C)	15,8	-	$-188,6$	$-416,8$	$-34,7$	41,1
$M4$	14	13 (C)	$-1,8$	$-9,8$	-	0	-16	$-2,6$
$D7$	5	25,1	-	-	-	-	-	-
$D8$	2	105,8 (C)	-	-	-	-	-	-
$P11$	13	208,5 (C)	-	$-27,6$	11,5	$-103,8$	46,3	3,8
$C14$	18	36,5 (C)	$-13,1$	$-281,1$	-	0	$-168,8$	$-7,8$

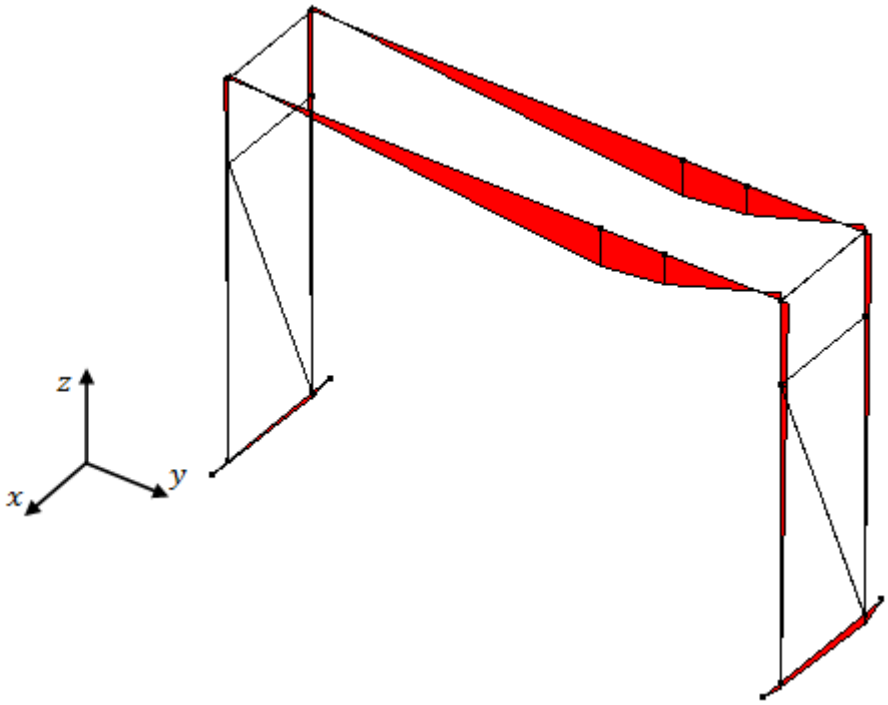


Figura 5.24 – Diagrama de momentos

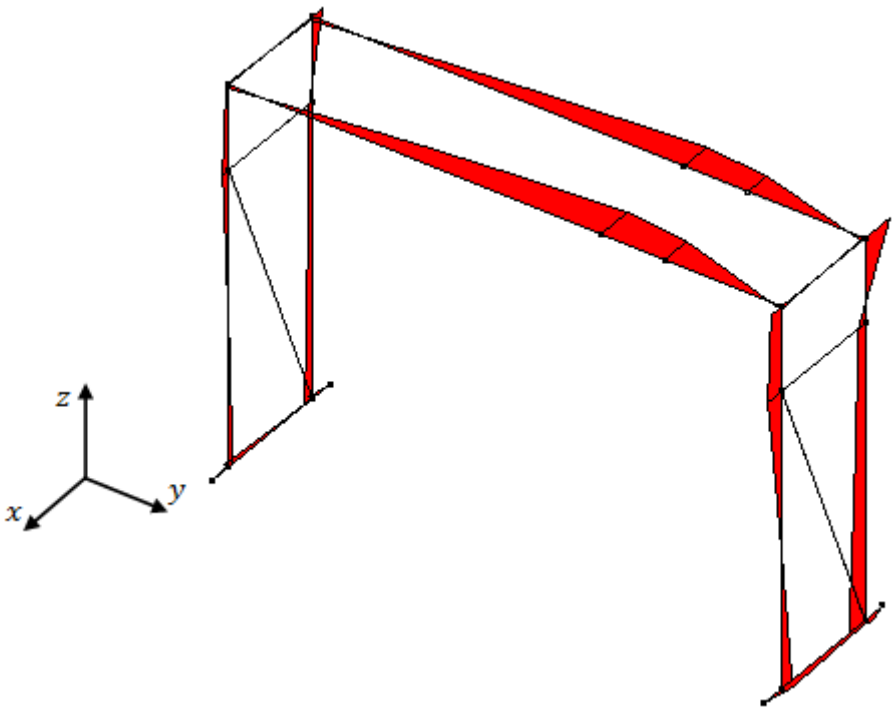


Figura 5.25 – Diagrama de momentos

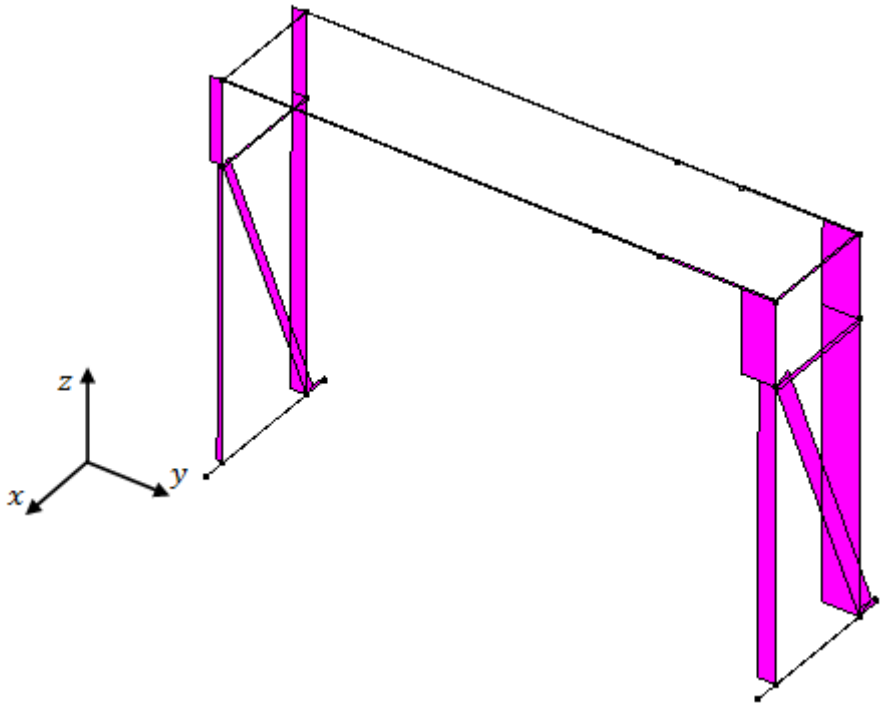


Figura 5.26 – Esforços Normais

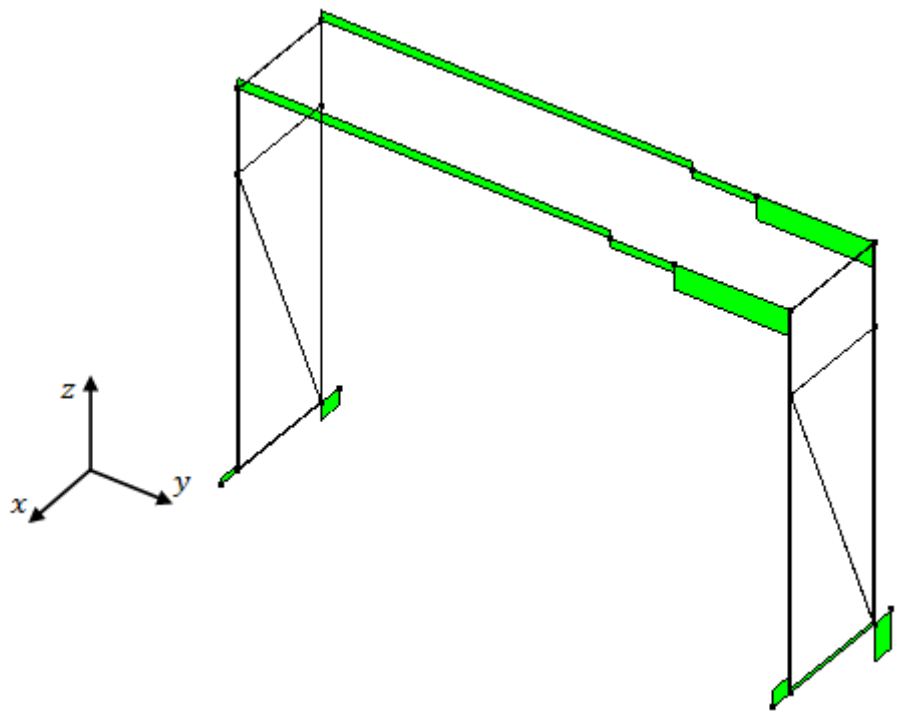


Figura 5.27 – Esforços transversos

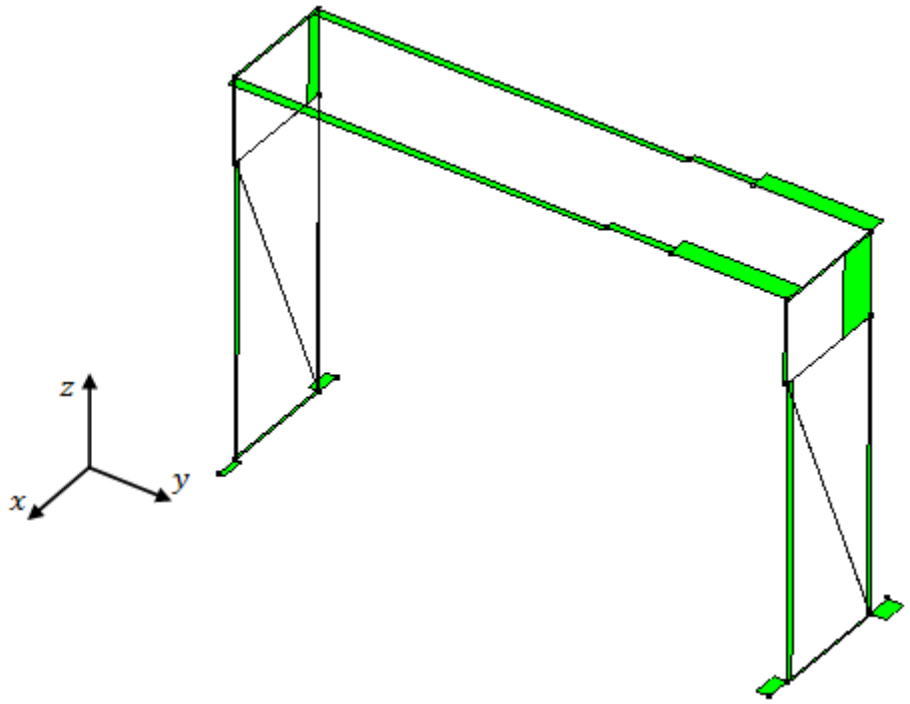


Figura 5.28 – Esforços transversos

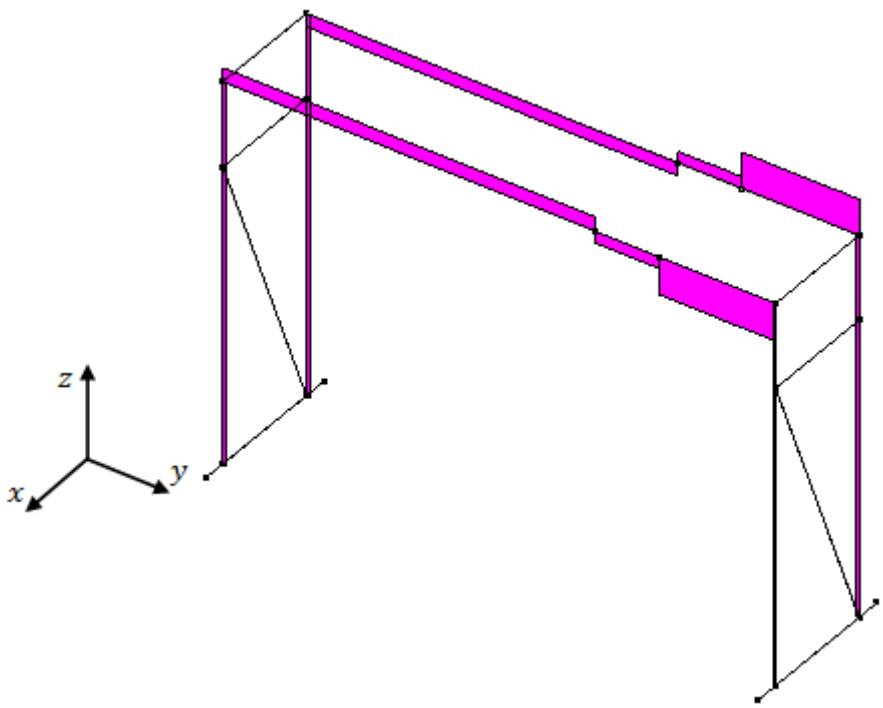


Figura 5.29 – Torção

Esforços – Carro-Guincho na posição P_{13}

Tabela 5.8 – Esforços máximos instalados na estrutura, para a posição do carro P_{13}

	Pontos Críticos	N_{sd} $[kN]$	$V_{sd.x-y}$ $[kN]$	$V_{sd.x-z}$ $[kN]$	$V_{sd.y-z}$ $[kN]$	$M_{sd.x}$ $[kN.m]$	$M_{sd.y}$ $[kN.m]$	$M_{sd.z}$ $[kN.m]$
$V2$	12	7,4 (C)	20,7	-	$-239,2$	2,4	$-43,8$	4,5
$M4$	14	16,4 (C)	$-0,7$	$-11,9$	-	0	-19	$-1,1$
$D7$	5	30,9	-	-	-	-	-	-
$D8$	2	126,2 (C)	-	-	-	-	-	-
$P11$	13	240,8 (C)	-	$-34,3$	6,2	$-55,5$	57,5	0,4
$C14$	18	43,3 (C)	$-6,3$	$-340,1$	-	0	$-200,8$	$-3,8$

5.6. Verificação das Secções ao Estado Limite Último

5.6.1. Viga resistente V1 e V2

Os casos mais críticos verificam-se para a viga $V2$ secção 11, para a posição P_7 do carro guincho a outra situação, verifica-se para a viga $V2$ secção 12, para a posição P_{13} do carro.

Tabela 5.9 – Esforços nas secções críticas (Viga resistente)

Secção 11, posição P7	Secção 12, posição P13
$N_{Sd} = 16{,}5\ kN\ (C)$	$N_{Sd} = 7{,}4\ (C)\ kN$
$V_{Sd.x-y} = -9{,}8\ kN$	$V_{Sd.x-y} = 20{,}7\ kN$
$V_{Sd.y-z} = 118{,}1\ kN$	$V_{Sd.y-z} = -239{,}2\ kN$
$M_{Sd.x} = -640{,}1\ kN.m$	$M_{Sd.x} = 2{,}4\ kN.m$
$M_{Sd.y} = 23{,}7\ kN.m$	$M_{Sd.y} = -43{,}8\ kN.m$
$M_{Sd.z} = 59{,}5\ kN.m$	$M_{Sd.z} = 4{,}5\ kN.m$

Secção – Caixão 530×920

Tabela 5.10 – Propriedades da secção

Propriedade	Valor	Unidade
m	180,4	kg/m
d	30	mm
f	60	mm
b	530	mm
h	920	mm
p	65	mm
t_w	7	mm
t_f	8	mm
A	22936	mm^2
I_x	$2999{,}6 \times 10^6$	mm^4
I_z	$751{,}8 \times 10^6$	mm^4
i_x	361,6	mm
i_z	181,1	mm
$w_{el,x\,min}$	$6032{,}1 \times 10^3$	mm^3
$w_{el,z\,min}$	$2681{,}1 \times 10^3$	mm^3

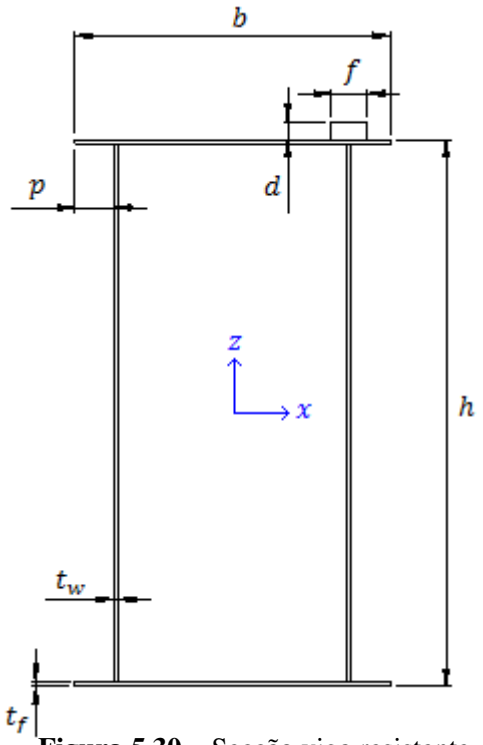


Figura 5.30 – Secção viga resistente

A verificação da resistência das secções de acordo com o EC3 é feita em relação a cada um dos modos de ruína associados aos diferentes esforços. Assim, e para o caso de peças solicitadas fundamentalmente à flexão, em primeiro lugar há que verificar a sua capacidade resistente em relação ao momento flector e ao esforço cortante. Paralelamente será verificada a interacção entre o esforço cortante e o momento flector bem como a resistência em relação a outros esforços secundários como a torção e o esforço normal.

Adicionalmente, e com particular importância no caso de peças como os perfis PRS, quer se trate de perfis de alma alta ou vigas caixão, que fazem uso de chapas finas por questões de economia de material devem verificar-se os potências riscos de instabilidade daí resultantes. Referimo-nos neste caso aos problemas de instabilidade da alma e dos banzos devido ao esforço cortante e ao enfunamento da alma provocado pela flexão e esforço cortante.

Para a verificação da resistência é necessário classificar a secção, o que permite definir o valor dos esforços resistentes em função da possibilidade da secção admitir um comportamento plástico, com plastificação parcial ou caracterizado pela tensão limite elástica.

Classificação da secção

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/235} = 1$$

- Banzo

$$\xi \times t \times f_y = N_{Sd}$$

$$\xi \times 8 \times 235 = 16{,}5 \times 10^3 \Rightarrow \xi = 8{,}8\, mm$$

$$\left(\frac{c}{2} + \frac{\xi}{2}\right) = \alpha \times c;\ \left(\frac{386}{2} + \frac{8{,}8}{2}\right) = \alpha \times 386 \Rightarrow \alpha = 0{,}51$$

$$\frac{c}{t} = \frac{386}{8} = 48{,}3 \leq \frac{396\,\varepsilon}{(13\alpha - 1)} = \frac{396 \times 1}{(13 \times 0{,}51 - 1)} = 70{,}4$$

Classe 1

- Banzo

$$\left(\frac{p}{2} + \frac{\xi}{2}\right) = \alpha \times p;\ \left(\frac{65}{2} + \frac{8{,}8}{2}\right) = \alpha \times 65 \Rightarrow \alpha = 0{,}57$$

$$\frac{p}{t} = \frac{65}{8} = 8{,}1 \leq \frac{9\,\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}} = \frac{9 \times 1}{0{,}57 \times \sqrt{0{,}57}} = 20{,}9$$

Então a secção é da classe 1.

Sequência dos cálculos:

1) Resistência à flexão composta com compressão
2) Resistência à torção
3) Resistência ao esforço transverso
4) Interacção entre Esforço Transverso, Momento Flector e Esforço Axial
5) Resistência à encurvadura local da alma por esforço transverso
6) Resistência à encurvadura do banzo no plano da alma
7) Resistência ao esmagamento da alma
8) Resistência ao enrugamento da alma
9) Resistência dos septos intermédios

Resistência à flexão composta com compressão - Secção 11 com $P7$

Os elementos com secções transversais das classes 1 e 2 sujeitas a uma combinação de flexão e compressão devem satisfazer a condição (5.5.4 (1) do EC 3):

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_{min}\, A\, \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_x\, M_{y.Sd}}{W_{pl.x}\frac{f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_z\, M_{z.Sd}}{W_{pl.z}\frac{f_y}{\gamma_{M1}}} < 1$$

com,

$$k_x = 1 - \frac{\mu_x \times N_{Sd}}{\chi_y \times A \times f_y}\ mas\ k_x \leq 1{,}5$$

$$\mu_x = \bar{\lambda}_x \times (2 \times \beta_{M.x} - 4) + \left[\frac{W_{pl,x} - W_{el,x}}{W_{el,x}}\right]\ mas\ \mu_x \leq 0{,}9$$

$$k_z = 1 - \frac{\mu_z \times N_{Sd}}{\chi_z \times A \times f_y}\ mas\ k_z \leq 1{,}5$$

$$\mu_z = \bar{\lambda}_z \times (2 \times \beta_{M.z} - 4) + \left[\frac{W_{pl.z} - W_{el.z}}{W_{el.z}}\right]\ mas\ \mu_z \leq 0{,}9$$

χ_{min} é o menor de χ_x e χ_z

Determinação do coeficiente de redução de encurvadura χ,

$$\chi_i = \frac{1}{\phi_i + \sqrt{{\phi_i}^2 - {\bar{\lambda}_i}^2}}$$

onde,

$$\phi_i = 0{,}5 \times \left[1 + \alpha_i \times \left(\bar{\lambda}_i - 0{,}2\right) + {\bar{\lambda}_i}^2\right]$$

$\bar{\lambda}_i$ é a esbelteza normalizada

O comprimento de encurvadura (l_e), quer segundo o eixo dos x-x quer segundo o eixo dos z-z foi considerado como sendo igual ao comprimento total da viga resistente $l_{e,x} = l_{e,z} = 13000\ mm$.

- Determinação do coeficiente de redução de encurvadura no eixo x-x

$$\phi_y = 0{,}5 \times \left[1 + \alpha_y \times \left(\bar{\lambda}_y - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}_y{}^2\right]$$

onde,

$\alpha = 0{,}34$ Curva b, pois $h/t_w = 131{,}5 > 30$ (6.2 do EC 3)

$$\lambda_1 = \pi\sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi\sqrt{\frac{210000}{235}} = 93{,}9$$

$$\lambda_x = \frac{l_{e,x}}{i_x} = \frac{13000}{361{,}6} = 35{,}9$$

$$\bar{\lambda}_x = \left(\frac{\lambda_x}{\lambda_1}\right)\sqrt{\beta_A} = \frac{35{,}9}{93{,}9} = 0{,}38 \quad (\beta_A = 1, para\ classe\ 1{,}2\ ou\ 3)$$

então,

$$\phi_x = 0{,}5 \times [1 + 0{,}34 \times (0{,}38 - 0{,}2) + 0{,}38^2] = 0{,}60$$

$$\chi_x = \frac{1}{0{,}60 + \sqrt{0{,}60^2 - 0{,}38^2}} = 0{,}94$$

- Determinação do coeficiente de redução de encurvadura no eixo z-z

$$\phi_z = 0{,}5 \times \left[1 + \alpha_z \times \left(\bar{\lambda}_z - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}_z{}^2\right]$$

onde,

$\alpha = 0{,}34$ Curva b, pois $h/t_w = 131{,}5 > 30$ (6.2 do EC 3)

$$\lambda_1 = \pi\sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi\sqrt{\frac{210000}{235}} = 93{,}9$$

$$\lambda_z = \frac{l_{e,z}}{i_z} = \frac{13000}{181{,}1} = 71{,}78$$

$$\bar{\lambda}_z = \left(\frac{\lambda_z}{\lambda_1}\right)\sqrt{\beta_A} = \frac{71{,}78}{93{,}9} = 0{,}76 \quad (\beta_A = 1, para\ classe\ 1{,}2\ ou\ 3)$$

então,

$$\phi_z = 0{,}5 \times [1 + 0{,}34 \times (0{,}76 - 0{,}2) + 0{,}76^2] = 0{,}89$$

$$\chi_z = \frac{1}{0{,}89 + \sqrt{0{,}89^2 - 0{,}76^2}} = 0{,}74$$

Como $\chi_x > \chi_z$ então χ_{min} é $\chi_z = 0{,}74$

- Determinação do factor de momento uniforme equivalente, $\beta_{M.x}$ (fig. 5.5.3 do EC 3)

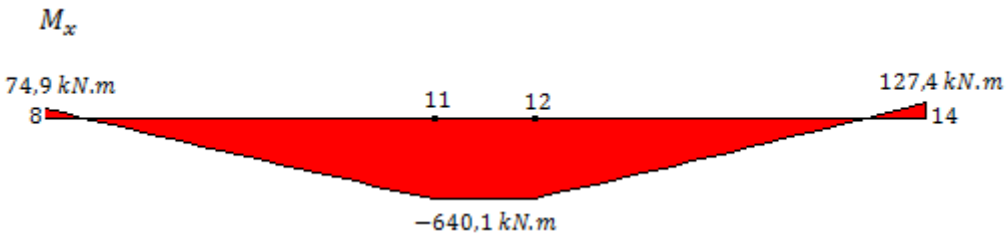


Figura 5.31 – Distribuição de momentos

$$M_Q = \left|\frac{M_1 + M_2}{2}\right| + |M_i|$$

M_i- corresponde ao mínimo de M indicado no cálculo do ΔM

$$M_Q = \left|\frac{74{,}9 + 127{,}4}{2}\right| + |-640{,}1| = 741{,}3\ kN.m$$

$$\Delta M = |M_{máx}| + |M_{min}| = |127{,}4| + |-640{,}1| = 767{,}1$$

$$M_1 = 127{,}4\ kN.m \qquad 74{,}9 = \psi \times M_1 \qquad \psi = 0{,}59$$

$$\beta_{MQ} = 1{,}4 \qquad \beta_{M\psi} = 1{,}8 - 0{,}7 \times 0{,}59 = 1{,}39$$

$$\beta_{Mx} = \beta_{M\psi} + \frac{M_Q}{\Delta M}\left(\beta_{MQ} - \beta_{M\psi}\right) = 1{,}39 + \frac{741{,}3}{767{,}1}(1{,}4 - 1{,}39) = 1{,}4$$

- Determinação factor de momento do uniforme equivalente, $\beta_{M.z}$ (fig. 5.5.3 do EC 3)

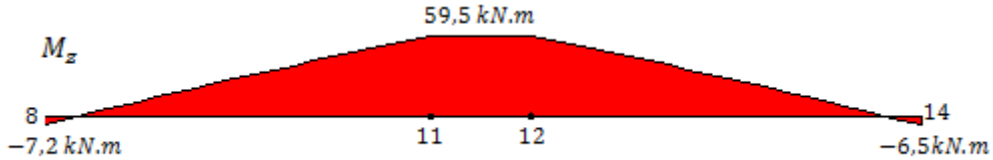


Figura 5.32 – Distribuição de momentos

$$M_Q = \left|\frac{M_1 + M_2}{2}\right| + |M_i|$$

M_i- corresponde ao máximo de M indicado no cálculo do ΔM

$$M_Q = \left|\frac{-7{,}2 - 6{,}5}{2}\right| + |59{,}5| = 66{,}4\ kN.m$$

$$\Delta M = |M_{máx}| + |M_{min}| = |59{,}5| + |-7{,}2| = 66{,}7$$

$$M_1 = -7{,}2\ kN.m \qquad -6{,}5 = \psi \times M_1 \qquad \psi = 0{,}90$$

$$\beta_{MQ} = 1{,}4 \qquad \beta_{M\psi} = 1{,}8 - 0{,}7 \times \psi = 1{,}17$$

$$\beta_{Mz} = \beta_{M\psi} + \frac{M_Q}{\Delta M}\left(\beta_{MQ} - \beta_{M\psi}\right) = 1{,}17 + \frac{66{,}4}{66{,}7}(1{,}4 - 1{,}17) = 1{,}4$$

Cálculo do módulo de resistência plástico ($W_{pl,x}, W_{pl,z}$). (Nota: para este cálculo foi desprezada a área do carril).

$$W_{pl,x} = 2\left(b \times t_f \times \left(\frac{h}{2} - t_f\right)\right) + 4\left(\left(\frac{h - 2t_f}{2}\right) \times t_w \times \left(\frac{h - 2t_f}{4}\right)\right) =$$

$$= 2\left(530 \times 8 \times \left(\frac{920}{2} - 8\right)\right) + 4\left(\left(\frac{920 - 2 \times 8}{2}\right) \times 7 \times \left(\frac{920 - 2 \times 8}{4}\right)\right) =$$

$$= 6693{,}2 \times 10^3\ mm^3$$

$$W_{pl,z} = 4\left(\frac{b}{2} \times t_f \times \frac{b}{4}\right) + 2\left(\left(h - 2t_f\right) \times t_w \times \left(\frac{b}{2} - p - \frac{t_w}{2}\right)\right) =$$

$$= 4\left(\frac{530}{2} \times 8 \times \frac{530}{4}\right) + 2\left((920 - 2 \times 8) \times 7 \times \left(\frac{530}{2} - 65 - \frac{7}{2}\right)\right) =$$

$$= 3610{,}5 \times 10^3\ mm^3$$

Está-se agora em condições de calcular os factores, μ e k :

$$\mu_x = 0{,}38 \times (2 \times 1{,}4 - 4) + \left[\frac{6693{,}2 - 6032{,}1}{6032{,}1}\right] = -0{,}35$$

$$k_x = 1 - \frac{-0{,}35 \times 16{,}5 \times 10^3}{0{,}94\ \times 22936 \times 235} = 1{,}001$$

$$\mu_z = 0{,}76 \times (2 \times 1{,}4 - 4) + \left[\frac{3610{,}5 - 2681{,}1}{2681{,}1}\right] = -0{,}57$$

$$k_z = 1 - \frac{-0{,}57 \times 16{,}5 \times 10^3}{0{,}74\ \times 22936 \times 235} = 1{,}003$$

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_{min}\ A\ \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_x\ M_{x.Sd}}{W_{pl.x}\frac{f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_z\ M_{z.Sd}}{W_{pl.z}\frac{f_y}{\gamma_{M1}}} < 1$$

Sendo assim e com $\gamma_{M1} = 1{,}33$ (de acordo com as normas F.E.M e para o caso de solicitação II, a tensão de cedência do material deve ser dividida por um factor de segurança de 1,33) temos,

$$\frac{16{,}5 \times 10^3}{0{,}74 \times 22936\ \times \frac{235}{1{,}33}} + \frac{1{,}001 \times 640{,}1 \times 10^6}{6693{,}2 \times 10^3 \times \frac{235}{1{,}33}} + \frac{1{,}003 \times 59{,}5 \times 10^6}{3610{,}5 \times 10^3 \times \frac{235}{1{,}33}} =$$

$$= 0{,}64 < 1$$

Resistência do perfil verificada.

Resistência a torção - Secção 12 com $P13$

Os esforços de torção na travessa resultam como se viu da excentricidade das cargas motivada pela posição relativa do caminho de rolamento em relação ao eixo da viga. O valor de cálculo da torção como se verá é substancialmente inferior ao valor do esforço resistente à torção. O caso crítico será o da Secção 12 com o carro na posição $P13$.

No caso de elementos sujeitos a torção em que as deformações de distorção poderão ser ignoradas, o valor de cálculo do momento torçor actuante T_{Ed} em cada secção transversal deverá satisfazer a condição, (6.2.7 do EC3)

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd}} \leq 1{,}0$$

Para secções de parede fina, e segundo a 1ª Fórmula de Bredt, as tensões tangenciais τ serão dadas por (5), (admitindo que τ é constante ao longo da espessura)

$$\tau = \frac{T}{2\,A\,t}$$

Onde, T é o momento torsor, A a área media da secção e t a espessura.

Para o limiar da plastificação, a tensão de corte máxima segundo o critério de Von Mises é dada por,

$$\tau_{máx} = \frac{\sigma_{ced}}{\sqrt{3}} = \frac{235}{\sqrt{3}} = 135{,}7\ Mpa$$

Então o momento torsor resistente T_{Rd} para a alma e para os banzos será dado respectivamente por,

- Banzo

$$T_{Rd,banzo} = \tau_{máx} \times 2 \times (b - 2p - t_w) \times \left(h - t_f\right) \times t_f =$$
$$= 135{,}7 \times 2 \times (530 - 2 \times 65 - 7) \times (920 - 8) \times 8 = 792{,}1\ N.m$$

- Alma

$$T_{Rd,alma} = \tau_{máx} \times 2 \times (b - 2p - t_w) \times \left(h - t_f\right) \times t_w =$$
$$= 135{,}7 \times 2 \times (530 - 2 \times 65 - 7) \times (920 - 8) \times 7 = 693{,}1\ \mathrm{N}.m$$

É na secção 12 onde se verifica o maior valor do momento torsor $M_{sd.y} = T_{Ed} = 43{,}8\ kN.m$. Está portanto assegurada a resistência quer da alma quer dos banzos.

Resistência ao Esforço Transverso - Secção 12 com $P13$

O valor do esforço transverso máximo verifica-se para a secção 12, carro na posição $P13$, $V_{Sd.y-z} = -239{,}2\ kN$. No caso de uma combinação de esforço transverso e momento torsor, o valor de cálculo do esforço transverso resistente plástico com torção deverá ser reduzido de $V_{pl,Rd}$ para $V_{pl,T,Rd}$ e o valor de cálculo do esforço transverso actuante deverá satisfazer a condição (6.2.6 do EC3):

$$\frac{V_{sd}}{V_{pl,T,Rd}} \leq 1{,}0$$

Onde, $V_{pl,T,Rd}$ para uma secção estrutural tubular é dado por (6.2.7 do EC3),

$$V_{pl,T,Rd} = \left[1 - \frac{\tau_{t,Sd}}{\left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)/\gamma_{M0}}\right] V_{pl,Rd}$$

A área de corte para uma secção em caixão bem,

- Carga paralela aos banzos:

$$A_{V1} = A - \sum (h_w\ t_w) = 21136 - (2 \times 904 \times 7) = 8480\ mm^2$$

- Carga paralela à alma:

Para a área resistente só se considera uma alma, pois o esforço transverso não está centrado com a secção caixão. Uma vez que o carril na qual rola o carro-guincho está sobre a alma de um dos lados, e como tal considera-se que 80% da carga descarrega sobre essa alma.

$$A_{V2} = \eta \sum (h_w\ t_w) = 1 \times (904 \times 7) = 6328\ mm^2$$

De forma conservativa pode-se tomar $\eta = 1$.

Pode-se, então calcular o esforço transverso resistente plástico,

$$V_{pl,Rd,x-y} = \frac{A_{V1}\left(f_y/\sqrt{3}\right)}{\delta_{M0}} = \frac{8480 \times \left(235/\sqrt{3}\right)}{1{,}33} = 865{,}1\ kN$$

$$V_{pl,Rd,y-z} = \frac{A_{V2}\left(f_y/\sqrt{3}\right)}{\delta_{M0}} = \frac{6328 \times \left(235/\sqrt{3}\right)}{1{,}33} = 645{,}6\ kN$$

Os valores da tensão tangencial e do esforço cortante resistente devido à torção, para os banzos e para a alma são dados por:

- Banzo

$$\tau_{t,sd,banzo} = \frac{M_{Sd.z}}{2(b-2p-t_w)\times\left(h-t_f\right)\times t_f} =$$

$$= \frac{43{,}8\times 10^6}{2(530-2\times 65-7)\times(920-8)\times 8} = 7{,}6\ Mpa$$

$$V_{pl,T,Rd,x-y} = \left[1-\frac{7{,}6}{\left(\frac{235}{\sqrt{3}}\right)/1{,}33}\right]\times 865{,}1\ = 828{,}7\ kN$$

- Alma

$$\tau_{t,sd,alma} = \frac{M_{Sd.z}}{2(b-2p-t_w)\times\left(h-t_f\right)\times t_w} =$$

$$= \frac{43{,}8\times 10^6}{2(530-2\times 65-7)\times(920-8)\times 7} = 8{,}7\ Mpa$$

$$V_{pl,T,Rd,y-z} = \left[1-\frac{8{,}7}{\left(\frac{235}{\sqrt{3}}\right)/1{,}33}\right]\times 645{,}6\ = 614{,}5\ kN$$

$$\frac{V_{Sd,x-y}}{V_{pl,T,Rd,x-y}} = \frac{20{,}7}{828{,}7} = 0{,}03 \leq 1{,}0 \quad Condição\ verificada.$$

$$\frac{V_{Sd,y-z}}{V_{pl,T,Rd,y-z}} = \frac{0{,}8\times 239{,}2}{614{,}5} = 0{,}31 \leq 1{,}0 \quad Condição\ verificada.$$

Quando da verificação da resistência à flexão é que se deve averiguar se há necessidade de reduzir o momento flector resistente ou não. Se o valor de cálculo do esforço cortante for inferior a 50% do esforço cortante resistente não há lugar a qualquer redução. Neste caso,

$$\frac{V_{Sd,x-y}}{V_{pl,T,Rd,x-z}} = \frac{20{,}7}{828{,}7} = 0{,}03 \leq 0{,}5$$

$$\frac{V_{Sd,y-z}}{V_{pl,T,Rd,y-z}} = \frac{0{,}8\times 239{,}2}{614{,}5} = 0{,}31 \leq 0{,}5$$

e portanto o efeito do esforço transverso sobre o momento flector resistente pode ser desprezado (6.2.8 do EC3).

Interacção entre Esforço Transverso, Momento Flector e Esforço Axial

Se V_{sd} exceder 50% de $V_{ba,rd}$(valor do esforço transverso resistente a encurvadura), a resistência de cálculo da secção transversal ao momento flector e ao esforço axial tem de ser reduzida para ter em conta o esforço transverso V_{sd} (5.6.7 do EC 3).

$$\frac{V_{Sd,y-z}}{V_{ba,rd}} = \frac{0{,}8 \times 239{,}2}{505{,}7} = 0{,}38 \leq 0{,}5 \quad Condição\ verificada.$$

Nota: O valor de $V_{ba,rd}$ é calculado no ponto de seguida.

Resistência à encurvadura local da alma por esforço transverso

Dada a geometria da secção resistente em que a alma é formada por chapas de espessura fina, será necessário ter em conta os riscos potências de ruína por instabilidade local ou global.

No caso de uma alma reforçada deverá verificar-se (5.4.6 (7) do EC 3),

$$\frac{d}{t_w} > 30\varepsilon\sqrt{k_\tau}$$

O coeficiente de enfunamento por tensões de corte k_τ, é dado por,

Tabela 5.11 – Coeficiente de enfunamento

Existem cutelos de reforço intermédios?		Valor de k_τ
Não		$k_\tau = 5{,}34$
Sim	$a/d < 1$	$k_\tau = 4 + \frac{5{,}34}{\left(\frac{a}{d}\right)^2}$
	$a/d \geq 1$	$k_\tau = 5{,}34 + \frac{4}{\left(\frac{a}{d}\right)^2}$

Onde a representa a distância entre septos e d a altura da alma da secção em caixão. Então,

$$\frac{a}{d} = \frac{2000}{904} = 2{,}21 > 1$$

Logo,

$$k_\tau = 5{,}34 + \frac{4}{\left(\frac{2000}{904}\right)^2} = 6{,}13$$

Como,

$$\frac{d}{t_w} > 30\varepsilon\sqrt{k_\tau} \quad ; \quad \frac{904}{7} = 129{,}1 > 30 \times 1 \times \sqrt{6{,}13} = 74{,}3$$

É necessária a verificação à encurvadura local da alma. Esta verificação será efectuada de acordo com o Método Pós-Crítico Simples (5.6.3 do EC3),

A resistência da alma ao esforço cortante tendo em conta os problemas de instabilidade, é definido em função da esbelteza da alma $\overline{\lambda}_w$ que é definida por,

$$\overline{\lambda}_w = \frac{\frac{d}{t_w}}{37{,}4\,\varepsilon\,\sqrt{k_\tau}} = \frac{\frac{904}{7}}{37{,}4 \times\ 1 \times \sqrt{6{,}13}} = 1{,}39$$

Pelo método Pós-Critico Simples, o valor de cálculo do esforço cortante, V_{sd}, deve ser inferior ao valor de calculo do esforço cortante resistente $V_{ba,rd}$.

Onde $V_{ba,rd}$ é dado por,

$$V_{ba,rd} = \frac{d\ t_w \tau_{ba}}{\gamma_{M1}}$$

Em que a tensão resistente pós-critica, τ_{ba} é dada em função da esbelteza da alma $\overline{\lambda}_w$. Dado que $\overline{\lambda}_w \geq 1{,}2$ então,

$$\tau_{ba} = \frac{0{,}9}{\overline{\lambda}_w}\frac{f_{yw}}{\sqrt{3}} = \frac{0{,}9}{1{,}39} \times \frac{235}{\sqrt{3}} = 87{,}9\ Mpa$$

então,

$$V_{ba,rd} = \frac{904 \times\ 7 \times 87{,}9}{1{,}1} = 505{,}7\ kN$$

$$\frac{V_{Sd,y-z}}{V_{ba,rd}} = \frac{0{,}8 \times 239{,}2}{505{,}7} = 0{,}38 \leq 1 \quad Condição\ verificada.$$

Resistência à encurvadura do banzo no plano da alma

Para impedir a possibilidade do banzo comprimido encurvar no plano da alma, a relação d/t_w da alma deve satisfazer o critério seguinte (5.7.7 do EC 3):

$$\frac{d}{t_w} \leq k\left(\frac{E}{f_{yb}}\right)\sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}}$$

Em que, A_w é a área da secção da alma, A_{fc} é a área do banzo comprimido, f_{yf} é a tensão de cedência do banzo comprimido e $k = 0{,}3$ para banzos da classe 1.

Então,

$$\frac{904}{7} = 129{,}1 \leq 0{,}3 \times \left(\frac{210 \times 10^3}{235}\right) \times \sqrt{\frac{904 \times 7}{530 \times 8}} = 327{,}5 \;\; Verificado$$

Resistência ao esmagamento da alma - Secção 11 com $P7$

O valor de cálculo da resistência ao esmagamento $R_{y,Rd}$ da alma, deverá ser feita para a secção 11 com $P7$, pois é ai que os momentos instalados são maiores, conduzindo assim a uma maior tensão longitudinal no banzo. O valor de cálculo da resistência ao esmagamento deve ser obtido a partir de 5.7.3 (1) do EC 3:

$$R_{y,Rd} = \frac{(s_s + s_y)t_w f_{yw}}{\gamma_{M1}}$$

Em que,

$$s_y = \frac{2{,}5\,(h-d)\left[1-\left(\frac{\gamma_{M0}\sigma_{f,Ed}}{f_{yf}}\right)^2\right]^{0,5}}{\left(1+0{,}8\,s_s\,/(h-d)\right)}$$

Onde,

h- Altura total;

d- Altura da alma;

f_{yf}, f_{yw} – Tensão de cedência do banzo e da alma;

$\sigma_{f,Ed}$ - Tensão longitudinal no banzo;

s_s - Comprimento de apoio rígido;

O comprimento de apoio rígido é determinado considerando uma degradação das cargas a 45º,

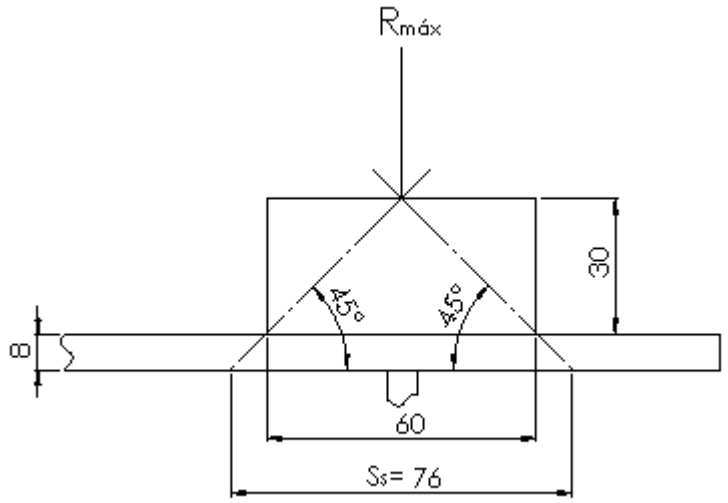


Figura 5.33 – Degradação da carga sobre o trilho

De acordo com a figura a baixo e com os esforços instalados para a secção 11 tem-se,

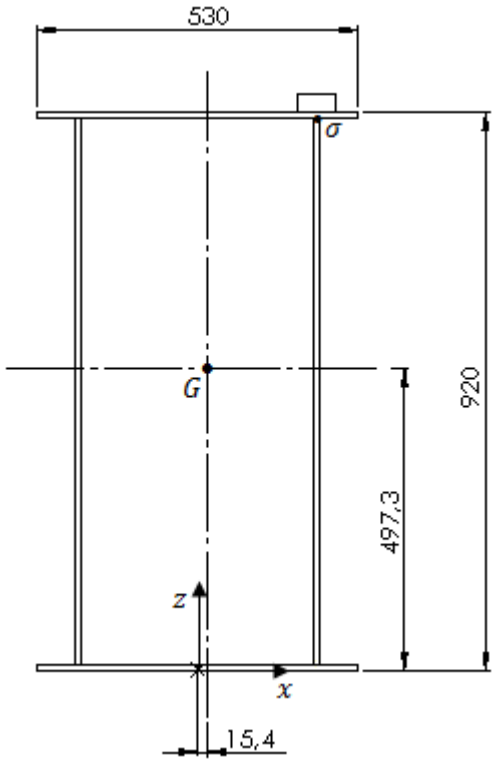


Figura 5.34 – Secção Caixão

$$\sigma_{f,Ed} = \frac{N}{A} + \frac{M_x\, h_1}{I_x} - \frac{M_z\, h_2}{I_z} =$$

$$= -\frac{16{,}5 \times 10^3}{22936} + \frac{-640{,}1 \times 10^6 \times 414{,}7}{2999{,}6 \times 10^6} - \frac{59{,}5 \times 10^6 \times 181{,}1}{751{,}8 \times 10^6}$$

$$= -103{,}6\ Mpa$$

Então,

$$s_y = \frac{2{,}5\ (920 - 904)\left[1 - \left(\frac{1{,}1 \times 103{,}6}{235}\right)^2\right]^{0{,}5}}{\left(1 + 0{,}8\ \times 76\ /(920 - 904)\right)} = 8{,}3$$

$$R_{y,Rd} = \frac{(76 + 8{,}3) \times 7 \times 235}{1{,}33} = 104{,}3\ kN > R_{máx} = 0{,}8 \times 120{,}5 = 96{,}4\ kN$$

Resistência verificada.

Nota: O factor de 0,8 deve-se ao facto de se assumir que 80 % da carga transmitida pelas rodas do carro guincho é descarregada apenas numa alma.

Resistência ao enrugamento da alma

O valor de cálculo da resistência ao enrugamento $R_{a,Rd}$ da alma obtém-se a partir de (5.7.4 do EC 3),

$$R_{a,Rd} = \frac{0{,}5\ t_w^2 \left(E\ f_{yw}\right)^{0{,}5} \left[\left(\frac{t_f}{t_w}\right)^{0{,}5} + 3\left(\frac{t_w}{t_f}\right)\left(\frac{s_s}{d}\right)\right]}{\gamma_{M1}}$$

Mas s_s/d não deve ser considerado superior a 0,2.

$$\frac{s_s}{d} = \frac{76}{904} = 0{,}08$$

Então,

$$R_{a,Rd} = \frac{0{,}5 \times 7^2 (210 \times 10^3 \times\ 235)^{0{,}5} \left[\left(\frac{8}{7}\right)^{0{,}5} + 3\left(\frac{7}{8}\right)\left(\frac{76}{904}\right)\right]}{1{,}33} = 166{,}9\ kN$$

$$166{,}9\ kN > R_{máx} = 0{,}8 \times 120{,}5 = 96{,}4\ kN \quad Condição\ verificada$$

De acordo com o ponto 5.7.4 (2) do EC3, nos casos em que a peça esteja também sujeita a momentos flectores, deve ser satisfeito o seguinte critério,

$$M_{sd} \leq M_{c,Rd}$$

$$\frac{R_{máx}}{R_{a,Rd}} + \frac{M_{sd}}{M_{c,rd}} \leq 1{,}5$$

$$M_{c,rd} = \frac{W_{pl,x}\, f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{6693{,}2 \times 10^3 \times\ 235}{1{,}33} = 1182{,}6\ > M_{sd} = 640{,}1\ kN.m$$

Então,

$$\frac{R_{máx}}{R_{a,Rd}} + \frac{M_{sd}}{M_{c,rd}} \leq 1{,}5$$

$$\frac{0{,}8 \times 120{,}5}{166{,}9} + \frac{640{,}1}{1182{,}6} = 1{,}1 \leq 1{,}5\ Condição\ verificada$$

Resistência dos cutelos ou septos intermédios - Secção 12 com $P13$

Devido ao fenómeno de enfunamento, foram considerados rigidificadores (septos) espaçados de 2 metros com $t_s = 6mm$ de espessura, estes para além de evitarem este fenómeno também evitam a excessiva flexibilidade das almas no transporte e manuseamento. De acordo com a norma espanhola NBE EA-95, deveram ser colocados septos sempre que a seguinte condição não se verifique (para um S 235),

$$\frac{t_w}{h} \geq 0{,}013 \Rightarrow \frac{7}{904} = 0{,}0077 \leq 0{,}013\ \ Condição\ não\ verificada$$

O esforço de compressão em cutelos intermédios deve ser obtido através de (5.6.5 e 5.7.6 do EC 3),

$$N_{sd} = V_{sd,y-z} - \frac{d\ t_w \tau_{bb}}{\gamma_{M1}}\ \ com\ N_{sd} \geq 0$$

Em que τ_{bb} é a tensão crítica a encurvadura por corte, dada em função de $\overline{\lambda}_w$.

$$\overline{\lambda}_w = \frac{\frac{d}{t_w}}{37{,}4\ \varepsilon\ \sqrt{k_\tau}} = \frac{\frac{904}{7}}{37{,}4 \times\ 1 \times \sqrt{6{,}13}} = 1{,}39$$

Como $\overline{\lambda}_w > 1{,}25$ então,

$$\tau_{bb} = \frac{1}{\overline{\lambda}_w^2} \frac{f_{yw}}{\sqrt{3}} = \frac{1}{1{,}39^2} \times \frac{235}{\sqrt{3}} = 70{,}2\ Mpa$$

$$N_{sd} = 239{,}2 \times 10^3 - \frac{904 \times\ 7 \times 70{,}2}{1{,}33} = -94{,}8\ kN$$

Como o N_{sd} deu negativo, isso significa que a alma por si só resiste ao esforço transverso. Sendo assim os cutelos estão verificados, no entanto e de acordo com a norma deverá também verificar-se, se o cutelo apresenta uma rigidez suficiente, para tal o momento de inércia mínimo do cutelo deve verificar a seguinte relação:

Como $a/d = 2000/904 = 2{,}2 \geq \sqrt{2}$ então,

$$I_{s,min} \geq 0{,}75\ d\ t_w^3 = 0{,}75 \times 904 \times 7^3 = 2{,}3 \times 10^5\ mm^4$$

O momento de inércia do septo é então dado por,

$$I_s = \frac{e_s\ (b - 2p - 2t_w)^3}{12} = \frac{6 \times\ (530 - 2 \times 65 - 2 \times 7)^3}{12} = 2{,}88 \times 10^7\ mm^4$$

$$I_s \geq I_{s,min}\ ;\ 2{,}88 \times 10^7 \geq 2{,}3 \times 10^5\ Condição\ verificada$$

Até agora a verificação da resistência foi efectuada de acordo com a Norma genérica para estruturas metálicas, o EC3. Passamos agora à verificação ao enfunamento da Alma de acordo com a Norma FEM.

5.6.1.1. Verificação da estabilidade da alma ao Enfunamento (F.E.M)

A verificação ao enfunamento é muito semelhante a verificação efectuada pela norma espanhola NBE EA-95. O processo de cálculo é em tudo semelhante, diferendo apenas nalguns parâmetros. As normas F.E.M são no entanto mais conservadoras, sugerindo a utilização de tensões inferiores na verificação da estabilidade.

Uma vez que a viga caixão esta submetida a esforços de flexão e corte, as tensões normais de compressão e as tensões de corte resultantes poderão originar instabilidade na alma por enfunamento desta. Para evitar a ocorrência de tal fenómeno são colocadas nervuras de rigidez designados por (septos) aumentando assim a estabilidade das almas ao enfunamento.

Para a verificação ao enfunamento é considerada uma tensão crítica de enfunamento, que é um múltiplo da tensão de referência de Euler, definida por,

$$\sigma_R^E = \frac{\pi^2 \times E}{12(1-\eta^2)}\left(\frac{e}{b}\right)^2$$

Onde b, representa a dimensão da placa medida no sentido perpendicular aos esforços de compressão, E o modulo de elasticidade e η o coeficiente de Poisson. Estes troços rectangulares da alma supõem-se simplesmente apoiados pelos seus quatro bordos. Na figura abaixo, $a = 2000\,mm$ representa distância entre septos, e $b = 904\,mm$ a altura da alma.

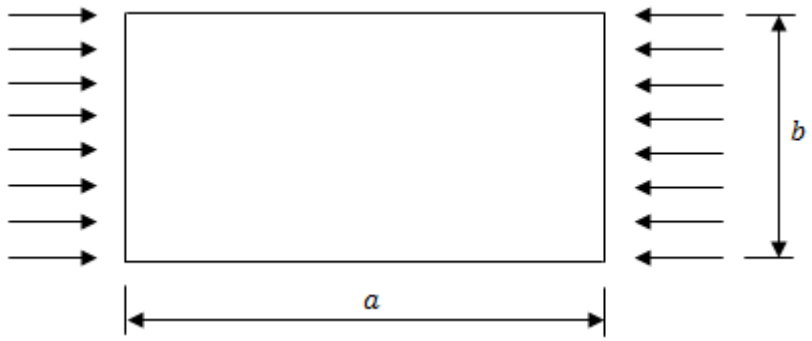


Figura 5.35 – Placa

Para um aço, com $E = 210000\ N/mm^2$ e $\eta = 0{,}3$, a tensão de Euler vem,

$$\sigma_R^E = 189800 \times \left(\frac{e}{b}\right)^2$$

A tensão crítica ao enfunamento, para os casos de solicitações simples de compressão ou corte será dada por:

Compressão:

$\sigma_{cr}^{V} = k_{\sigma} \times \sigma_{R}^{E}$

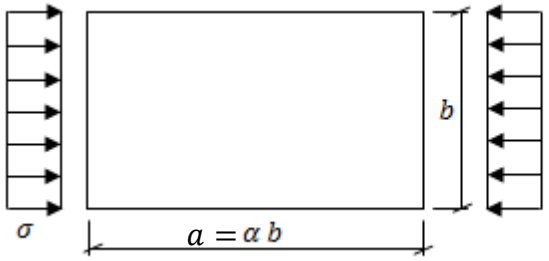
Corte:

$\tau_{cr}^{V} = k_{\tau} \times \sigma_{R}^{E}$

Os coeficientes de enfunamento, k_{σ} e k_{τ} são calculados a partir das expressões dadas pelas normas F.E.M, são apresentados cinco casos diferentes, dependendo dos valores ψ e α.

Caso I

Compressão simples e uniforme $\psi = 0$

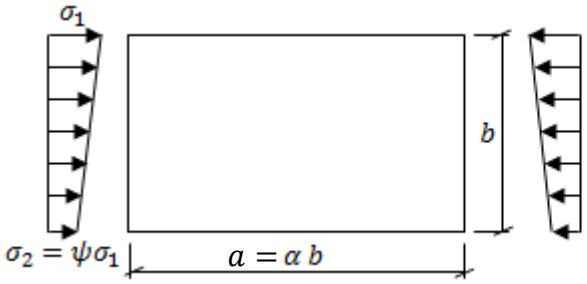


$\alpha \geq 1 \qquad k_{\sigma} = 4$

$\alpha \leq 1 \qquad k_{\sigma} = \left(\alpha + \frac{1}{\alpha}\right)^2$

Caso II

Compressão não uniforme $0 < \psi < 1$

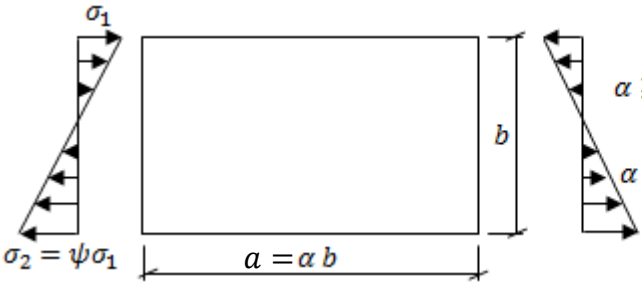


$\alpha \geq 1 \qquad k_{\sigma} = \frac{8{,}4}{\psi + 1{,}1}$

$\alpha \leq 1 \qquad k_{\sigma} = \frac{2{,}1}{\psi + 1{,}1} \times \left(\alpha + \frac{1}{\alpha}\right)^2$

Caso III

Flexão simples $\psi = -1$ ou flexão com predomínio da tracção $\psi < -1$

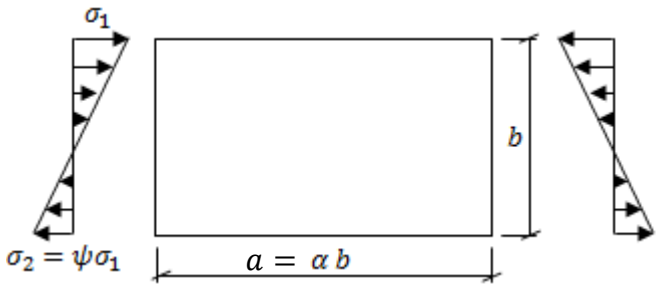


$\alpha \geq 2/3 \qquad k_{\sigma} = 23{,}9$

$\alpha \leq 2/3 \qquad k_{\sigma} = 15{,}87 + \frac{1{,}87}{\alpha^2} + 8{,}6\alpha^2$

Caso IV

Flexão com compressão preponderante $-1 < \psi < 0$



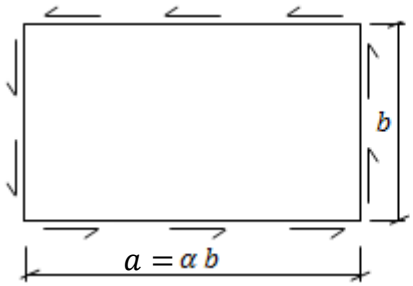
$$k_\sigma = (1+\psi)k' - \psi k'' + 10(1+\psi)$$

$$k' = k_\sigma \; para \;\; \psi = 0 \; do \; caso \; II$$

$$k'' = k_\sigma \; para \; flexão \; pura \; (caso \; III)$$

Caso V

Corte puro



$$\alpha \geq 1 \qquad k_\tau = 5{,}34 + \frac{4}{\alpha^2}$$

$$\alpha \leq 1 \qquad k_\tau = 4 + \frac{5{,}34}{\alpha^2}$$

Compressão e Corte:

Para situações em que estejam presentes os dois tipos de esforços (compressão e corte), a tensão de comparação crítica de enfunamento $\sigma_{cr,c}^{V}$ vem dada por,

$$\sigma_{cr,c}^{V} = \frac{\sqrt{\sigma^2 + 3\,\tau^2}}{\frac{1+\psi}{4} \times \frac{\sigma}{\sigma_{cr}^{V}} + \sqrt{\left(\frac{3-\psi}{4} \times \frac{\sigma}{\sigma_{cr}^{V}}\right)^2 \times \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}^{V}}\right)^2}}$$

Onde, σ é a tensão máxima de compressão para o troço de alma em causa, resultante do momento flector M^* e esforço axial, e τ é a tensão tangencial, no troço, admitindo que o esforço cortante V^* é integralmente resistido pela alma e que a tensão de corte é uniformemente distribuída ao longo da altura da alma.

No caso dos valores máximos de M^* e V^* não coincidirem na mesma secção do troço, devem verificar-se as duas secções, uma onde o valor de M^* é máximo e outra onde V^* é máximo.

De seguida verifica-se, se a instabilidade ocorre no domínio elástico ou não elástico.

- Se, $\sigma_{cr}^{V}\ ou\ \sqrt{3}\,\tau_{cr}^{V}\ ou\ \sigma_{cr,c}^{V} \leq \sigma_P = 0{,}8\,f_y$

Neste caso o enfunamento dá-se antes de esgotada a capacidade de resistência elástica. O valor da tensão crítica teórica coincide então com o valor da tensão crítica real.

- Se, $\sigma_{cr}^{V}\ ou\ \sqrt{3}\,\tau_{cr}^{V}\ ou\ \sigma_{cr,c}^{V} \geq \sigma_P = 0{,}8\,f_y$

Ao trabalhar-se em regime elastoplástico, o módulo de elasticidade deixa de constante, passando a variar de ponto para ponto da curva, tensões /deformações, a correcção efectuada tem em consideração a variação do módulo de elasticidade tangente. A tensão real, passa a ser obtida pela multiplicação de um coeficiente de correcção,

$$\sigma_{real} = 50 \times \left[\beta + \sqrt{\beta^2 - 0{,}6}\right] \times (0{,}8 - \beta) \times \sigma_{cr}^{V}\ ou\ \sqrt{3}\,\tau_{cr}^{V}\ ou\ \sigma_{cr,c}^{V}$$

$$\beta = 0{,}8 - \frac{f_y}{50 \times \sigma_{cr}^{V}\ ou\ \sqrt{3}\,\tau_{cr}^{V}\ ou\ \sigma_{cr,c}^{V}}$$

Uma vez determinado o valor de $\sigma_{cr,c,real}^{V}$, a verificação da estabilidade da alma obriga a que se verifique a seguinte condição (isto para o caso de compressão e corte),

$$\sqrt{\boldsymbol{\sigma^2 + 3\tau^2}} \leq \frac{\boldsymbol{\sigma_{cr,c,real}^{V}}}{\boldsymbol{\nu}}$$

De acordo com as Normas F.E.M, o valor de $\sigma_{cr,c,real}^{V}$ deve ser dividido por um coeficiente de segurança $\boldsymbol{\nu}$, em que para o caso de solicitação II (Funcionamento da ponte com consideração da acção do vento) é dado por,

$$\nu = 1{,}50 + 0{,}125(\psi - 1)$$

Uma vês efectuada a introdução teórica, procede-se de seguida a verificação das secções ao enfunamento provocado pela flexão e esforço transverso.

Esforços - Secção 11 com *P7*

Verificação da Estabilidade da Alma ao Enfunamento (Norma F.E.M)

De acordo com os esforços instalados para a secção 11 tem-se,

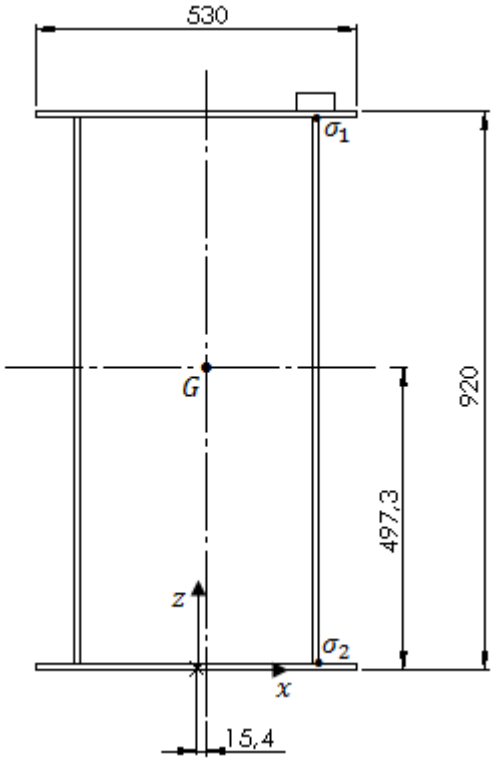


Figura 5.36 – Secção caixão - Centro de Massa

$$\sigma_1 = \frac{N^*}{A} + \frac{M_x^* \, h_1}{I_x} = -\frac{16{,}5 \times 10^3}{22936} + \frac{-640{,}1 \times 10^6 \times 414{,}7}{2999{,}6 \times 10^6} = -89{,}2 \; Mpa$$

$$\sigma_2 = \frac{N^*}{A} + \frac{M_x^* \, h_2}{I_x} = -\frac{16{,}5 \times 10^3}{22936} + \frac{-640{,}1 \times 10^6 \times -489{,}3}{2999{,}6 \times 10^6} = 103{,}7 \; Mpa$$

$$\tau = \frac{0{,}8 \, V_{sd,y-z}}{t_w\left(h - 2t_f\right)} + \frac{M_{sd.y}}{2(b - 2p - t_w) \times \left(h - t_f\right) \times t_w} =$$

$$= \frac{0{,}8 \times 118{,}1 \times 10^3}{7 \times (920 - 2 \times 8)} + \frac{23{,}7 \times 10^6}{2(530 - 2 \times 65 - 7) \times (920 - 8) \times 7} = 19{,}6 \; Mpa$$

Nota: Na tensão de corte a primeira parcela faz referência ao esforço transverso, e como já foi dito considera-se que 80 % desse esforço é absorvido pela alma que esta sobre o carril, a segunda parcela faz referência as tensões tangenciais provocadas pela torção.

Para o cálculo dos coeficientes de enfunamento define-se,

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{103{,}7}{-89{,}2} = -1{,}16$$

$$\alpha = \frac{a}{b} = \frac{2000}{904} = 2{,}21$$

De acordo com os quatro casos atrás definidos, está-se perante o caso de flexão com tracção preponderante $\psi < -1$ e $\alpha = 2{,}21 \geq 2/3$ com, então tem-se,

$k_\sigma = 23{,}9$

Como $\alpha = 2{,}21 \geq 1$, então tem-se que k_τ é dado por,

$$k_\tau = 5{,}34 + \frac{4}{\alpha^2} = 5{,}34 + \frac{4}{2{,}21^2} = 6{,}2$$

A tensão de referência de Euler vem,

$$\sigma_R^E = 189800 \times \left(\frac{t_w}{b}\right)^2 = 189800 \times \left(\frac{7}{904}\right)^2 = 11{,}4\ Mpa$$

A tensão critica ao enfunamento vem,

<u>Compressão:</u>

$$\sigma_{cr}^V = k_\sigma \times \sigma_R^E = 23{,}9 \times 11{,}4 = 272{,}5\ Mpa \geq \sigma_P = 0{,}8 \times 235 = 188\ Mpa$$

$$\beta = 0{,}8 - \frac{f_y}{50 \times \sigma_{cr,c}^V} = 0{,}8 - \frac{235}{50 \times 272{,}5} = 0{,}782752$$

$$\sigma_{cr,real}^V = 50 \times \left[\beta + \sqrt{\beta^2 - 0{,}6}\right] \times (0{,}8 - \beta) \times \sigma_{cr}^V = 210{,}4\ Mpa$$

<u>Corte:</u>

$$\tau_{cr}^V = k_\tau \times \sigma_R^E = 6{,}2 \times 11{,}4 = 70{,}7\ Mpa$$

$$\sqrt{3}\ \tau_{cr}^V = \sqrt{3} \times 70{,}7 = 122{,}5 \leq \sigma_P = 0{,}8 \times 235 = 188\ Mpa \Rightarrow \tau_{cr}^V = \tau_{cr,real}^V$$

A tensão de comparação crítica de enfunamento $\sigma_{cr,c}^V$ vem dada por,

$$\sigma_{cr,c}^V = \frac{\sqrt{\sigma^2 + 3\,\tau^2}}{\frac{1+\psi}{4} \times \frac{\sigma}{\sigma_{cr}^V} + \sqrt{\left(\frac{3-\psi}{4} \times \frac{\sigma}{\sigma_{cr}^V}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}^V}\right)^2}}$$

$$\sigma_{cr,c}^V = \frac{\sqrt{89{,}2^2 + 3\ \times 19{,}6^2}}{\frac{1-1{,}16}{4} \times \frac{89{,}2}{210{,}4} + \sqrt{\left(\frac{3+1{,}16}{4} \times \frac{89{,}2}{210{,}4}\right)^2 + \left(\frac{19{,}6}{70{,}7}\right)^2}} = 189{,}4\ Mp$$

Calcula-se de seguida, a tensão crítica real,

$\sigma_{cr,c}^{V} \geq \sigma_P = 0{,}8\, f_y \Rightarrow 189{,}4 \geq 188 = 0{,}8 \times 235\ Mpa$

então,

$$\beta = 0{,}8 - \frac{f_y}{50 \times \sigma_{cr,c}^{V}} = 0{,}8 - \frac{235}{50 \times 189{,}4} = 0{,}775185$$

$$\sigma_{cr,real}^{V} = 50 \times \left[\beta + \sqrt{\beta^2 - 0{,}6}\right] \times (0{,}8 - \beta) \times \sigma_{cr,c}^{V} = 189{,}2\ Mpa$$

Determinada a tensão de comparação critica real de enfunamento, a estabilidade da chapa é assegurada se,

$$\nu = 1{,}50 + 0{,}125(\psi - 1) = 1{,}50 + 0{,}125(-1{,}16 - 1) = 1{,}23$$

$$\sqrt{\boldsymbol{\sigma^2 + 3\tau^2}} \leq \frac{\boldsymbol{\sigma_{cr,c,real}^{V}}}{\boldsymbol{\nu}} \Rightarrow \sqrt{89{,}2^2 + 3 \times 19{,}6^2} = 104{,}9 \leq \frac{189{,}2}{1{,}23} = 153{,}8\ Mpa$$

Condição verificada.

Esforços - Secção 12 com $P13$

Verificação da Estabilidade da Alma ao Enfunamento (Norma F.E.M)

De acordo com os esforços instalados para a secção 12 tem-se,

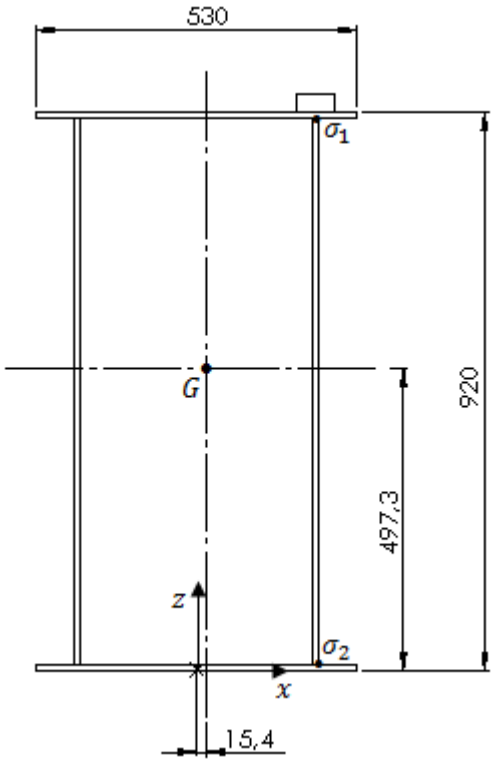


Figura 5.37 – Secção caixão - Centro de Massa

Como o momento M_x é muito reduzido, pode-se assumir que apenas temos corte então,

$$\tau = \frac{0{,}8\, V_{sd,y-z}}{t_w\left(h - 2t_f\right)} + \frac{M_{sd.y}}{2(b - 2p - t_w) \times \left(h - t_f\right) \times t_w} =$$

$$= \frac{0{,}8 \times 239{,}2 \times 10^3}{7 \times (920 - 2 \times 8)} + \frac{43{,}8 \times 10^6}{2(530 - 2 \times 65 - 7) \times (920 - 8) \times 7} = 40\ Mpa$$

Nota: Na tensão de corte a primeira parcela faz referência ao esforço transverso, e como já foi dito considera-se que 80 % desse esforço é absorvido pela alma que esta sobre o carril, a segunda parcela faz referência as tensões tangenciais provocadas pela torção.

Para o cálculo dos coeficientes de enfunamento define-se,

$$\alpha = \frac{a}{b} = \frac{2000}{904} = 2{,}21$$

Como $\alpha = 2{,}21 \geq 1$, então tem-se que k_τ é dado por,

$$k_\tau = 5{,}34 + \frac{4}{\alpha^2} = 5{,}34 + \frac{4}{2{,}21^2} = 6{,}2$$

A tensão de referência de Euler vem,

$$\sigma_R^E = 189800 \times \left(\frac{t_w}{b}\right)^2 = 189800 \times \left(\frac{7}{904}\right)^2 = 11{,}4\ Mpa$$

A tensão critica ao enfunamento vem,

<u>Corte:</u>

$$\tau_{cr}^V = k_\tau \times \sigma_R^E = 6{,}2 \times 11{,}4 = 70{,}7\ Mpa$$

$$\sqrt{3}\ \tau_{cr}^V = \sqrt{3} \times 70{,}7 = 122{,}5 \leq \sigma_P = 0{,}8 \times 235 = 188\ Mpa \Rightarrow \tau_{cr}^V = \tau_{cr,real}^V$$

Determinada a tensão de corte crítica real de enfunamento, a estabilidade da chapa é assegurada se,

$$\nu = 1{,}50 + 0{,}125(\psi - 1) = 1{,}50 + 0{,}125(-1{,}18 - 1) = 1{,}22$$

$$\boldsymbol{\tau} \leq \frac{\boldsymbol{\tau_{cr,real}^V}}{\boldsymbol{\nu}} \Rightarrow 40 \leq \frac{70{,}7}{1{,}22} = 57{,}9\ Mpa$$

Condição verificada

Nota: Também deverá ser feita, a verificação da estabilidade do banzo ao enfunamento, no entanto tal não se justifica pois os esforços (M_z e V_{x-y}) são muito inferiores quando comparados com (M_x e V_{y-z}), a espessura do banzo é superior a da alma e também o comprimento do banzo é inferior ao da alma. Apesar de o I_z ser inferior ao I_x, não é compensado pela diferença dos momentos $M_x\ e\ M_z$. Sendo assim os banzos estão verificados quanto ao enfunamento.

5.6.2. Travessa M3 e M4

O caso mais crítico verifica-se para a travessa $M3$ secção 8, para a posição P_1 do carro guincho.

Tabela 5.12 – Esforços na secção crítica (Travessa M3 e M4)

Secção 8, posição P1
$N_{Sd} = 17{,}1\ \ kN\ (C)$
$V_{sd.x-y} = 0{,}6\ kN$
$V_{Sd.x-z} = -12{,}2\ kN$
$M_{Sd.x} = 0\ kN.m$
$M_{Sd.y} = -19{,}7\ kN.m$
$M_{Sd.z} = 0{,}8\ kN.m$

Secção – SHS 200×100×6,3

Tabela 5.13 – Propriedades da secção

Propriedade	Valor	Unidade
m	28,1	kg/m
b	100	mm
h	200	mm
c	81,1	mm
d	181,1	mm
t	6,3	mm
A	3580	mm^2
I_y	$18{,}29 \times 10^6$	mm^4
I_z	$6{,}13 \times 10^6$	mm^4
i_y	71,5	mm
i_z	41,4	mm
$w_{el,y}$	183×10^3	mm^3
$w_{el,z}$	123×10^3	mm^3
$w_{pl,y}$	228×10^3	mm^3
$w_{el,z}$	140×10^3	mm^3
I_t	$14{,}75 \times 10^6$	mm^4

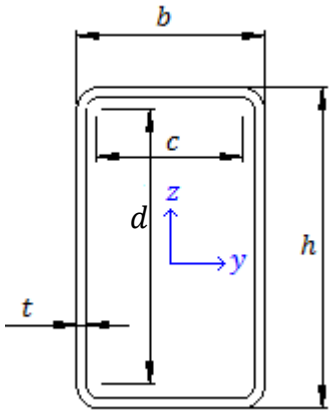


Figura 5.38 – Secção SHS

Classificação da secção

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/235} = 1$$

- Alma

$$\xi \times t \times f_y = N_{Sd}$$

$$\xi \times 6{,}3 \times 235 = 17{,}1 \times 10^3 \Rightarrow \xi = 11{,}6\ mm$$

$$\left(\frac{d}{2} + \frac{\xi}{2}\right) = \alpha \times d;\ \left(\frac{181{,}1}{2} + \frac{11{,}6}{2}\right) = \alpha \times 181{,}1 \Rightarrow \alpha = 0{,}53$$

$$\frac{d}{t} = \frac{181{,}1}{6{,}3} = 28{,}8 \leq \frac{396\ \varepsilon}{(13\alpha - 1)} = \frac{396 \times 1}{(13 \times 0{,}53 - 1)} = 67{,}2$$

Classe 1

- Banzo

$$\left(\frac{c}{2} + \frac{\xi}{2}\right) = \alpha \times c;\ \left(\frac{81{,}1}{2} + \frac{11{,}6}{2}\right) = \alpha \times 81{,}1 \Rightarrow \alpha = 0{,}57$$

$$\frac{c}{t} = \frac{81{,}1}{6{,}3} = 12{,}9 \leq \frac{396\ \varepsilon}{(13\alpha - 1)} = \frac{396 \times 1}{(13 \times 0{,}57 - 1)} = 61{,}8$$

Então a secção é da classe 1.

Resistência à flexão composta com compressão

Os elementos com secções transversais das classes 1 e 2 sujeitas a uma combinação de flexão e compressão devem satisfazer a condição (5.5.4 (1) do EC 3):

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_{min}\ A\ \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_y\ M_{y.Sd}}{W_{pl.y}\frac{f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_z\ M_{z.Sd}}{W_{pl.z}\frac{f_y}{\gamma_{M1}}} < 1$$

com,

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y \times N_{Sd}}{\chi_y\ \times A \times f_y}\ mas\ k_y \leq 1{,}5$$

$$\mu_y = \bar{\lambda}_y \times \left(2 \times \beta_{M.y} - 4\right) + \left[\frac{W_{pl,y} - W_{el,y}}{W_{el,y}}\right]\ mas\ \mu_y \leq 0{,}9$$

$$k_z = 1 - \frac{\mu_z \times N_{Sd}}{\chi_z\ \times A \times f_y}\ mas\ k_z \leq 1{,}5$$

$$\mu_z = \bar{\lambda}_z \times (2 \times \beta_{M.z} - 4) + \left[\frac{W_{pl.z} - W_{el.z}}{W_{el.z}}\right]\ mas\ \mu_z \leq 0{,}9$$

χ_{min} é o menor de χ_y e χ_z

Determinação do coeficiente de redução de encurvadura χ ,

$$\chi_i = \frac{1}{\phi_i + \sqrt{{\phi_i}^2 - {\bar{\lambda}_i}^2}}$$

onde,

$$\phi_\mathrm{i} = 0{,}5 \times \left[1 + \alpha_i \times \left(\bar{\lambda}_i - 0{,}2\right) + {\bar{\lambda}_i}^2\right]$$

$\bar{\lambda}_i$ é a esbelteza normalizada

O comprimento de encurvadura (l_e), segundo o eixo dos y-y e z-z é igual a distância entre pórticos que é cerca de $l_{e,y} = l_{e,z} = 2800\ mm$.

- Determinação do coeficiente de redução de encurvadura no eixo y-y

$$\phi_y = 0{,}5 \times \left[1 + \alpha_y \times \left(\bar{\lambda}_y - 0{,}2\right) + {\bar{\lambda}_y}^2\right]$$

onde,

$\alpha = 0{,}21$ Curva *a,* secções acabadas a quente (6.2 do EC 3)

$$\lambda_1 = \pi\sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi\sqrt{\frac{210000}{235}} = 93{,}9$$

$$\lambda_y = \frac{l_{e,y}}{i_y} = \frac{2800}{71{,}5} = 39{,}2$$

$$\bar{\lambda}_y = \left(\frac{\lambda_y}{\lambda_1}\right)\sqrt{\beta_A} = \frac{32{,}1}{93{,}9} = 0{,}42 \quad (\beta_\mathrm{A} = 1, \text{para classe 1,2 ou 3})$$

então,

$$\phi_y = 0{,}5 \times [1 + 0{,}21 \times (0{,}42 - 0{,}2) + 0{,}42^2] = 0{,}61$$

$$\chi_y = \frac{1}{0{,}61 + \sqrt{0{,}61^2 - 0{,}42^2}} = 0{,}95$$

- Determinação do coeficiente de redução de encurvadura no eixo z-z

$$\phi_z = 0{,}5 \times \left[1 + \alpha_z \times \left(\bar{\lambda}_z - 0{,}2\right) + {\bar{\lambda}_z}^2\right]$$

onde,

$\alpha = 0{,}21$ Curva *a,* secções acabadas a quente (6.2 do EC 3)

$$\lambda_1 = \pi\sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi\sqrt{\frac{210000}{235}} = 93{,}9$$

$$\lambda_z = \frac{l_{e,z}}{i_z} = \frac{2800}{41{,}4} = 67{,}6$$

$$\bar{\lambda}_z = \left(\frac{\lambda_z}{\lambda_1}\right)\sqrt{\beta_A} = \frac{67{,}6}{93{,}9} = 0{,}72 \quad (\beta_A = 1, \text{para classe 1,2 ou 3})$$

então,

$$\phi_z = 0{,}5 \times [1 + 0{,}21 \times (0{,}72 - 0{,}2) + 0{,}72^2] = 0{,}81$$

$$\chi_z = \frac{1}{0{,}81 + \sqrt{0{,}81^2 - 0{,}72^2}} = 0{,}85$$

Como $\chi_z > \chi_y$ então χ_{min} é $\chi_z = 0{,}85$

- Determinação do factor de momento uniforme equivalente, $\beta_{M.y}$ (fig. 5.5.3 do EC 3)

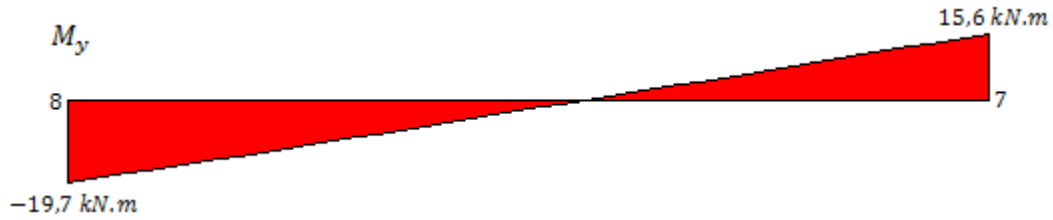


Figura 5.39 – Distribuição de momentos

$$M_1 = -19{,}7\ kN.m \qquad 15{,}6 = \psi \times M_1 \qquad \psi = -0{,}79$$

$$\beta_{M,y} = 1{,}8 - 0{,}7\,\psi = 2{,}35$$

- Determinação do factor de momento uniforme equivalente, $\beta_{M.z}$ (fig. 5.5.3 do EC 3)

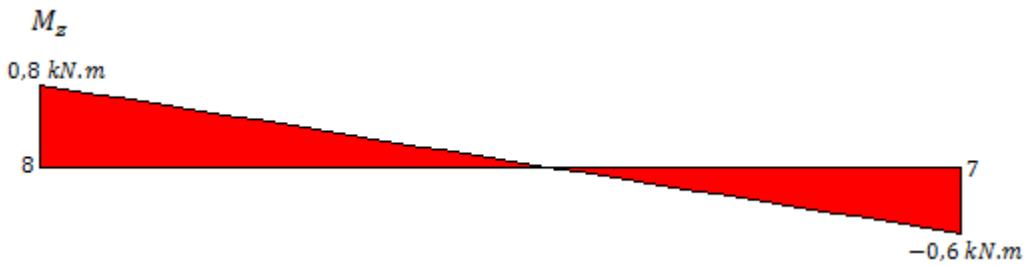


Figura 5.40 – Distribuição de momentos

$$M_1 = 0{,}8\ kN.m \qquad -0{,}6 = \psi \times M_1 \qquad \psi = -0{,}75$$

$$\beta_{M,z} = 1{,}8 - 0{,}7\,\psi = 2{,}32$$

Está-se agora em condições de calcular os factores, μ e k :

$$\mu_y = 0{,}42 \times (2 \times 2{,}35 - 4) + \left[\frac{228 - 183}{183}\right] = 0{,}54$$

$$k_y = 1 - \frac{0{,}54 \times 17{,}1 \times 10^3}{0{,}95 \times 3580 \times 235} = 1$$

$$\mu_z = 0{,}72 \times (2 \times 2{,}32 - 4) + \left[\frac{140 - 123}{123}\right] = 0{,}59$$

$$k_z = 1 - \frac{0{,}59 \times 17{,}1 \times 10^3}{0{,}85 \ \times 3580 \times 235} = 1$$

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_{min}\, A\, \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_y\, M_{y.Sd}}{W_{pl.y} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_{zz}\, M_{z.Sd}}{W_{pl.z} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} < 1$$

Sendo assim e com $\gamma_{M1} = 1{,}33$ (de acordo com as normas F.E.M e para o caso de solicitação II, a tensão de cedência do material deve ser dividida por um factor de segurança de 1,33) temos,

$$\frac{17{,}1 \times 10^3}{0{,}85 \times 3580 \ \times \frac{235}{1{,}33}} + \frac{1 \times 19{,}7 \times 10^6}{228 \times 10^3 \times \frac{235}{1{,}33}} + \frac{1 \times 0{,}8 \times 10^6}{140 \times 10^3 \times \frac{235}{1{,}33}} = 0{,}55 < 1$$

Resistência do perfil verificada.

Resistência ao Esforço Transverso

Apesar de os esforços transversos nas travessas apresentarem valores reduzidos, deverá verificar-se a necessidade de reduzir os momentos resistentes e de verificar a seguinte condição (6.2.6 do EC 3).

$$\frac{V_{sd}}{V_{pl,T,Rd}} \leq 1{,}0$$

A área de corte para um perfil rectangular tubular é dada por,

Carga paralela à largura:

$$A_{V1} = \frac{A\, b}{(b + h)} = \frac{3580 \times 100}{(100 + 200)} = 1193{,}3\ mm^2$$

Carga paralela à altura:

$$A_{V2} = \frac{A\, h}{(b + h)} = \frac{3580 \times 200}{(100 + 200)} = 2386{,}7\ mm^2$$

O esforço transverso resistente plástico é dado por,

$$V_{pl,Rd,x-y} = \frac{A_{V1}\left(f_y/\sqrt{3}\right)}{\delta_{M0}} = \frac{1193{,}3 \times \left(235/\sqrt{3}\right)}{1{,}33} = 121{,}7\ kN$$

$$V_{pl,Rd,x-z} = \frac{A_{V2}\left(f_y/\sqrt{3}\right)}{\delta_{M0}} = \frac{2386{,}7 \times \left(235/\sqrt{3}\right)}{1{,}33} = 243{,}5\ kN$$

então,

$$\frac{V_{sd,x-y}}{V_{pl,Rd,x-y}} = \frac{0{,}6}{121{,}7} = 0{,}01 \leq 1\ \ Condição\ verificada$$

$$\frac{V_{sd,x-z}}{V_{pl,Rd,x-z}} = \frac{12{,}2}{243{,}5} = 0{,}05 \leq 1\ \ Condição\ verificada$$

Deverá verificar-se também a necessidade de reduzir os momentos resistentes, devido a interacção entre o momento flector e o esforço transverso (6.2.8 do EC 3)

$$\frac{V_{sd,x-y}}{V_{pl,Rd,x-y}} = \frac{0{,}6}{121{,}7} = 0{,}01 \leq 0{,}5\ \ Condição\ verificada$$

$$\frac{V_{sd,x-z}}{V_{pl,Rd,x-z}} = \frac{12{,}2}{243{,}5} = 0{,}05 \leq 0{,}5\ \ Condição\ verificada$$

Então o efeito do esforço transverso sobre o momento flector resistente pode ser desprezado.

Nota: Apesar de existirem, para outras posições do carro guincho esforços transversos superiores ($V_{sd,x-y}$), não se justifica fazer a verificação pois estes são muito reduzidos, quando comparados com valor resistente, como de resto se pode verificar pelos cálculos acima.

Resistência à encurvadura local da alma por esforço transverso

De acordo com o ponto 5.4.6 (7) do EC 3:

$$\frac{d}{t} = \frac{181{,}1}{6{,}3} = 28{,}8 < 69\varepsilon = 69$$

Logo não é necessária a verificação à encurvadura local da alma.

5.6.3. Travessa D5 e D7

O caso mais crítico verifica-se para a travessa $D5$ secção 5, para a posição P_1 do carro guincho.

Esforços instalados (secção 5):

$N_{sd} = 31{,}9\ kN$

Secção – CHS 139,7×5

Tabela 5.14 – Propriedades da secção

Propriedade	Valor	Unidade
m	16,6	kg/m
D	139,7	mm
t	5	mm
A	2120	mm^2
I	$4{,}81 \times 10^6$	mm^4
i	47,7	mm
w_{el}	$68{,}8 \times 10^3$	mm^3
w_{pl}	$90{,}8 \times 10^3$	mm^3

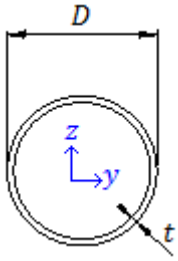


Figura 5.41 – Secção CHS

Estado limite de utilização

Em relação ao estado limite de utilização será necessário verificar a deformada para o peso próprio do perfil escolhido.

A flecha máxima é dada por:

$$y_{máx} = \frac{5\ q\ L^4}{384\ E\ I} = \frac{5 \times 166 \times 10^{-3} \times 2800^4}{384 \times 210 \times 10^3 \times 4{,}81 \times 10^6} = 0{,}13\ mm \leq \frac{L}{200} = 14\ mm$$

Estado Limite Último

Classificação da secção

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

- Para secções tubulares (5.5 do EC 3)

$$\frac{d}{t} = \frac{139{,}7}{5} = 27{,}9 < 50\,\varepsilon^2 = 50$$

Então é da Classe 1

Resistência a tracção

O valor de cálculo do esforço de tracção actuante N_{sd} em cada secção deve satisfazer a seguinte condição (5.4.3 do EC3),

$$\frac{N_{sd}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

Em que $N_{t,Rd}$ é o valor de cálculo da resistência a tracção da secção transversal,

$$N_{pl,Rd} = \frac{A\,f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2120 \times 235}{1{,}33} = 374{,}6\ kN$$

Então,

$$\frac{31{,}9}{374{,}6} = 0{,}08 \leq 1\ Condição\ Verificada$$

Nota: Seria possível escolher um perfil de menor secção, no entanto por uma questão de uniformidade escolheu-se o mesmo perfil das diagonais. E também pelo facto de quando as cargas horizontais trocam de sentido esta travessa fica à compressão, no entanto com um esforço inferior ($N_{sd} = 12{,}5\ (C)\ kN$) ao verificado para a diagonal $D6$, sendo assim está verificado para ambas as situações.

5.6.4. Diagonal D6 e D8

O caso mais crítico verifica-se para a diagonal $D6$ secção 5, para a posição P_1 do carro guincho.

Esforços instalados (secção 5):

$N_{sd} = 127{,}9\ (C)\ kN$

Secção – CHS 139,7×5

Tabela 5.15 – Propriedades da secção

Propriedade	Valor	Unidade
m	16,6	kg/m
D	139,7	mm
t	5	mm
A	2120	mm^2
I	$4{,}81 \times 10^6$	mm^4
i	47,7	mm
w_{el}	$68{,}8 \times 10^3$	mm^3
w_{pl}	$90{,}8 \times 10^3$	mm^3

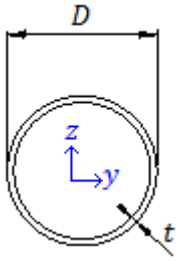


Figura 5.42 – Secção CHS

Estado limite de utilização

Em relação ao estado limite de utilização será necessário verificar a deformada para o peso próprio do perfil escolhido.

A flecha máxima é dada por:

$$y_{máx} = \frac{5\ q\ L^4}{384\ E\ I} = \frac{5 \times 166 \times 10^{-3} \times 7539{,}2^4}{384 \times 210 \times 10^3 \times 4{,}81 \times 10^6} = 6{,}9\ mm \leq \frac{7539{,}2}{200} = 37{,}7\ mm$$

Estado Limite Último

Classificação da secção

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

- Para secções tubulares (5.5 do EC 3)

$$\frac{d}{t} = \frac{139,7}{5} = 27,9 < 50\,\varepsilon^2 = 50$$

Então é da Classe 1

Resistência a encurvadura

Para elementos sujeitos a compressão axial, o valor de cálculo do esforço axial N_{sd}, deve verificar a seguinte condição (5.5.1 do EC3).

$$N_{Sd} \leq N_{b,rd}$$

onde,

$$N_{b,rd} = \frac{\chi\ \beta_A\, A\, f_y}{\gamma_{M1}}$$

Determinação do coeficiente de redução de encurvadura χ .

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

$\beta_A = 1$, para secções da classe 1

Esbelteza de Euler

$$\lambda_1 = \pi\sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi\sqrt{\frac{210000}{235}} = 93,9$$

$$\phi = 0,5 \times \left[1 + \alpha_i \times \left(\bar{\lambda} - 0,2\right) + \bar{\lambda}^2\right]$$

Onde,

$\alpha_i = 0,21$, curva *a* pois acabado a quente (6.2 do EC 3)

$$\lambda = \frac{l_e}{i} = \frac{7539,2}{47,7} = 158,1$$

$$\bar{\lambda} = \left(\frac{\lambda}{\lambda_1}\right)\sqrt{\beta_A} = \frac{158,1}{93,9} = 1,68 \quad (\beta_A = 1, \text{para classe 1})$$

Então,

$$\phi = 0,5 \times [1 + 0,21 \times (1,68 - 0,2) + 1,68^2] = 2,1$$

$$\chi = \frac{1}{2,1 + \sqrt{2,1^2 - 1,68^2}} = 0,29$$

Então calcula-se:

$$N_{Sd} = 127{,}9\ kN < \frac{0{,}29 \times 1 \times\ 2640 \times\ 235}{1{,}33} = 135{,}3\ kN$$

Sendo assim o perfil tubular CHS 139,7×5 verifica.

Nota: Quando as cargas horizontais trocam de sentido esta diagonal fica a tracção, mas este perfil como já calculado anteriormente tem, um valor de cálculo da resistência a tracção de $N_{pl,Rd} = 374{,}6\ kN$, que é muito superior ao valor instalado que é de $N_{sd} = 119{,}2\ kN$, que se verifica quando as cargas trocam de sentido.

5.6.5. Pilar P9,P10,P11 e P12

Os casos mais críticos verificam-se para o pilar $P9$ secção 7, para a posição P_1 do carro guincho a outra situação, verifica-se para o pilar $P11$ secção 13, para a posição P_{10} do carro.

Tabela 5.16 – Esforços nas secções críticas (Viga resistente)

Secção 7, posição P1	**Secção 13, posição P10**
$N_{Sd} = 242{,}2\ kN\ (C)$	$N_{Sd} = 208{,}5\ (C)\ kN$
$V_{Sd.x-z} = -35{,}2\ kN$	$V_{Sd.x-z} = -27{,}6\ kN$
$V_{Sd.y-z} = -0{,}3\ kN$	$V_{Sd.y-z} = 11{,}5\ kN$
$M_{Sd.x} = -2{,}4\ kN.m$	$M_{Sd.x} = -103{,}8\ kN.m$
$M_{Sd.y} = 58{,}7\ kN.m$	$M_{Sd.y} = 46{,}3\ kN.m$
$M_{Sd.z} = 0{,}8\ kN.m$	$M_{Sd.z} = 3{,}8\ kN.m$

Secção – SHS 500×300×8

Tabela 5.17 – Propriedades da secção

Propriedade	Valor	Unidade
m	97,9	kg/m
b	300	mm
h	500	mm
c	276	mm
d	476	mm
t	8	mm
A	12500	mm^2
I_x	$437{,}28 \times 10^6$	mm^4
I_y	$199{,}51 \times 10^6$	mm^4
i_x	187	mm
i_y	126	mm
$w_{el,x}$	1749×10^3	mm^3
$w_{el,y}$	1330×10^3	mm^3
$w_{pl,x}$	2100×10^3	mm^3
$w_{pl,y}$	1480×10^3	mm^3
I_t	$425{,}63 \times 10^6$	mm^3

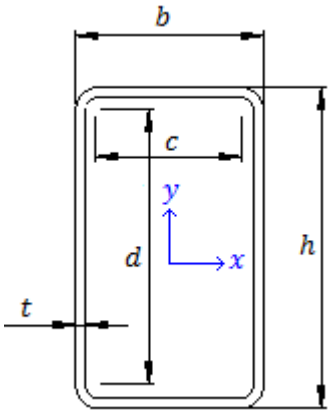


Figura 5.43 – Secção RHS

Classificação da secção

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/235} = 1$$

- Alma

$$\xi \times t \times f_y = N_{Sd}$$

$$\xi \times 8 \times 235 = 242{,}2 \times 10^3 \Rightarrow \xi = 128{,}8\ mm$$

$$\left(\frac{d}{2} + \frac{\xi}{2}\right) = \alpha \times d;\ \left(\frac{476}{2} + \frac{128{,}8}{2}\right) = \alpha \times 476 \Rightarrow \alpha = 0{,}64$$

$$\frac{d}{t} = \frac{476}{8} = 59{,}5 \leq \frac{396\ \varepsilon}{(13\alpha - 1)} = \frac{396 \times 1}{(13 \times 0{,}64 - 1)} = 54{,}1$$

Não é da classe 1

$$\frac{d}{t} = \frac{476}{8} = 59{,}5 \leq \frac{456\ \varepsilon}{(13\alpha - 1)} = \frac{456 \times 1}{(13 \times 0{,}64 - 1)} = 62{,}3$$

Classe 2

- Banzo

$$\left(\frac{c}{2} + \frac{\xi}{2}\right) = \alpha \times c;\ \left(\frac{276}{2} + \frac{128{,}8}{2}\right) = \alpha \times 276 \Rightarrow \alpha = 0{,}73$$

$$\frac{c}{t} = \frac{276}{8} = 34{,}5 \leq \frac{396\ \varepsilon}{(13\alpha - 1)} = \frac{396 \times 1}{(13 \times 0{,}73 - 1)} = 43{,}3$$

Classe 1

Então a secção é da classe 2.

Resistência à flexão composta com compressão - Secção 13 com $P10$

Os elementos com secções transversais das classes 1 e 2 sujeitas a uma combinação de flexão e compressão devem satisfazer a condição (5.5.4 (1) do EC 3):

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_{min}\ A\ \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_x\ M_{x.Sd}}{W_{pl.x}\frac{f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_y\ M_{y.Sd}}{W_{pl.y}\frac{f_y}{\gamma_{M1}}} < 1$$

com,

$$k_x = 1 - \frac{\mu_x \times N_{Sd}}{\chi_x\ \times A \times f_y}\ mas\ k_x \leq 1{,}5$$

$$\mu_x = \bar{\lambda}_x \times (2 \times \beta_{M.x} - 4) + \left[\frac{W_{pl,x} - W_{el,x}}{W_{el,x}}\right]\ mas\ \mu_x \leq 0{,}90$$

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y \times N_{Sd}}{\chi_y \times A \times f_y} \; mas \; k_y \leq 1{,}5$$

$$\mu_y = \bar{\lambda}_y \times \left(2 \times \beta_{M.y} - 4\right) + \left[\frac{W_{pl.y} - W_{el.y}}{W_{el.y}}\right] mas \; \mu_y \leq 0{,}90$$

χ_{min} é o menor de χ_x e χ_y

Determinação do coeficiente de redução de encurvadura χ ,

$$\chi_i = \frac{1}{\phi_i + \sqrt{\phi_i^{\,2} - \bar{\lambda}_i^{\,2}}}$$

onde,

$$\phi_i = 0{,}5 \times \left[1 + \alpha_i \times \left(\bar{\lambda}_i - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}_i^{\,2}\right]$$

$\bar{\lambda}_i$ é a esbelteza normalizada

Comprimento de encurvadura l_e

O comprimento de encurvadura (l_e), foi determinado considerando duas situações distintas, para o comprimento de encurvadura em torno do eixo dos x-x, é considerado o esquema estático da figura 5.44 (lado esquerdo), considerando o pilar simplesmente apoiado na base, pois os carros laterais podem rodar ligeiramente, para o comprimento de encurvadura em torno dos eixos dos y-y, é considerado o esquema estático da figura 5.44 (lado direito).

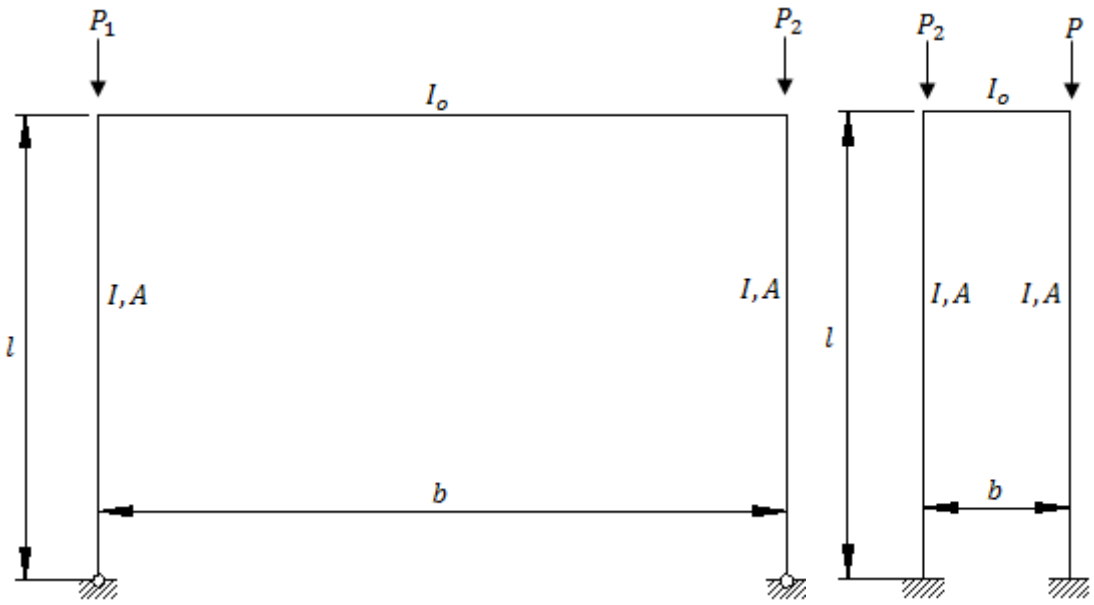


Figura 5.44 - Comprimento $l_{e,x}$ / $l_{e,y}$

De acordo com os esquemas dos pórticos acima e consultando a norma NBE-EA-95 (6) , e fazendo algumas simplificações, tem-se que os comprimentos de encurvadura segundo x e y serão dados por,

- Comprimento de encurvadura $l_{e,x}$

$$\beta = \sqrt{0{,}51(1+m)} \times \sqrt{4 + 1{,}4(c+6s) + 0{,}02(c+6s)^2}$$

Onde,

$$m = \frac{P_1}{P_2} = \frac{78{,}5}{208{,}5} = 0{,}38 \leq 1$$

$$c = \frac{I\ b}{I_o\ l} = \frac{437{,}28 \times 10^6 \times 13000}{2999{,}6 \times 10^6 \times 9000} = 0{,}2 \leq 10$$

$$s = \frac{4\ I}{b^2\ A} = \frac{4 \times 437{,}28 \times 10^6}{13000^2 \times 12500} = 0{,}0008 \leq 0{,}2$$

Então,

$$\beta = \sqrt{0{,}51(1+0{,}38) \times}$$
$$\times \sqrt{4 + 1{,}4(0{,}2 + 6 \times 0{,}0008) + 0{,}02(0{,}2 + 6 \times 0{,}0008)^2}$$

$$\beta = 1{,}74$$

$$l_{e,x} = l \times \beta = 9000 \times 1{,}74 = 15660\ mm$$

- Comprimento de encurvadura $l_{e,y}$

$$\beta = \sqrt{0{,}51(1+m)} \times \sqrt{1 + 0{,}35(c+6s) - 0{,}017(c+6s)^2}$$

Onde,

$$m = \frac{P}{P_2} = \frac{186{,}6}{208{,}5} = 0{,}89 \leq 1$$

$$c = \frac{I\ b}{I_o\ l} = \frac{199{,}51 \times 10^6 \times 2800}{18{,}29 \times 10^6 \times 9000} = 3{,}39 \leq 10$$

$$s = \frac{4\ I}{b^2\ A} = \frac{4 \times 199{,}51 \times 10^6}{2800^2 \times 12500} = 0{,}008 \leq 0{,}2$$

Então,

$$\beta = \sqrt{0{,}51(1+0{,}89) \times}$$
$$\times \sqrt{1 + 0{,}35(3{,}39 + 6 \times 0{,}008) - 0{,}017(3{,}39 + 6 \times 0{,}008)^2}$$

$$\beta = 1{,}44$$

$$l_{e,y} = l \times \beta = 9000 \times 1{,}44 = 12960\ m$$

- Determinação do coeficiente de redução de encurvadura no eixo x-x

$$\phi_x = 0{,}5 \times \left[1 + \alpha_x \times \left(\bar{\lambda}_x - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}_x{}^2\right]$$

onde,

$\alpha = 0{,}21$ Curva *a,* secções acabadas a quente (6.2 do EC 3)

$$\lambda_1 = \pi\sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi\sqrt{\frac{210000}{235}} = 93{,}9$$

$$\lambda_x = \frac{l_{e,x}}{i_x} = \frac{15660}{187} = 83{,}7$$

$$\bar{\lambda}_x = \left(\frac{\lambda_x}{\lambda_1}\right)\sqrt{\beta_A} = \frac{83{,}7}{93{,}9} = 0{,}89 \quad (\beta_A = 1, \text{para classe 1,2 ou 3})$$

então,

$$\phi_x = 0{,}5 \times [1 + 0{,}21 \times (0{,}89 - 0{,}2) + 0{,}89^2] = 0{,}97$$

$$\chi_x = \frac{1}{0{,}97 + \sqrt{0{,}97^2 - 0{,}89^2}} = 0{,}74$$

- Determinação do coeficiente de redução de encurvadura no eixo y-y

$$\phi_y = 0{,}5 \times \left[1 + \alpha_y \times \left(\bar{\lambda}_y - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}_y{}^2\right]$$

onde,

$\alpha = 0{,}21$ Curva *a,* secções acabadas a quente (6.2 do EC 3)

$$\lambda_1 = \pi\sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi\sqrt{\frac{210000}{235}} = 93{,}9$$

$$\lambda_y = \frac{l_{e,y}}{i_y} = \frac{12960}{126} = 102{,}9$$

$$\bar{\lambda}_y = \left(\frac{\lambda_y}{\lambda_1}\right)\sqrt{\beta_A} = \frac{102{,}9}{93{,}9} = 1{,}10 \quad (\beta_A = 1, \text{para classe 1,2 ou 3})$$

então,

$$\phi_y = 0{,}5 \times [1 + 0{,}21 \times (1{,}10 - 0{,}2) + 1{,}10^2] = 1{,}20$$

$$\chi_y = \frac{1}{1{,}20 + \sqrt{1{,}20^2 - 1{,}10^2}} = 0{,}60$$

Como $\chi_x > \chi_y$ então χ_{min} é $\chi_y = 0{,}60$

- Determinação do factor de momento uniforme equivalente, $\beta_{M.x}$ (fig. 5.5.3 do EC 3)

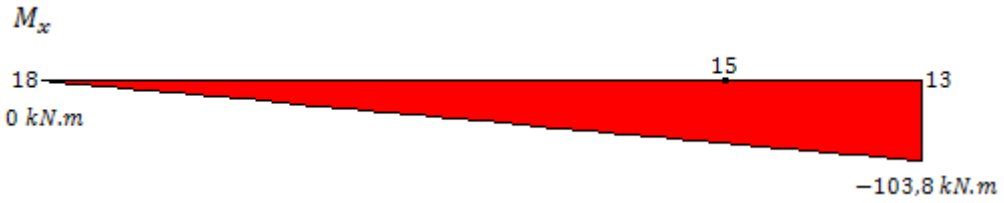


Figura 5.45 – Distribuição de momentos

$$M_1 = -103{,}8\ kN.m \qquad 0 = \psi \times M_1 \qquad \psi = 0$$

$$\beta_{M,x} = 1{,}8 - 0{,}7\ \psi = 1{,}8$$

- Determinação do factor de momento uniforme equivalente, $\beta_{M.y}$ (fig. 5.5.3 do EC 3)

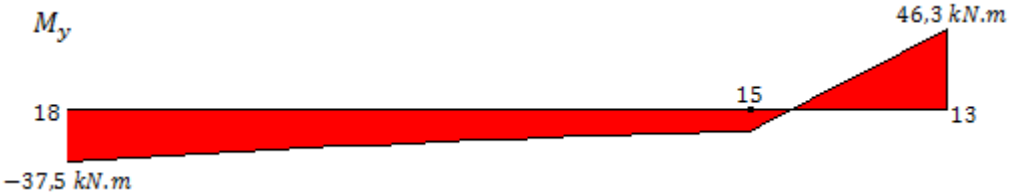


Figura 5.46 – Distribuição de momentos

$$M_Q = \left|\frac{M_1 + M_2}{2}\right| + |M_i|$$

M_i- corresponde ao máximo de M indicado no cálculo do ΔM

$$M_Q = \left|\frac{-37{,}5 + 46{,}3}{2}\right| + |46{,}3| = 50{,}7\ kN.m$$

$$\Delta M = |M_{máx}| + |M_{min}| = |46{,}3| + |-37{,}5| = 83{,}8$$

$$M_1 = 46{,}3\ kN.m \qquad -37{,}5 = \psi \times M_1 \qquad \psi = -0{,}81$$

$$\beta_{MQ} = 1{,}4 \qquad \beta_{M\psi} = 1{,}8 - 0{,}7 \times \psi = 2{,}37$$

$$\beta_{M,y} = \beta_{M\psi} + \frac{M_Q}{\Delta M}\left(\beta_{MQ} - \beta_{M\psi}\right) = 2{,}37 + \frac{50{,}7}{83{,}8}(1{,}4 - 2{,}37) = 1{,}78$$

Está-se agora em condições de calcular os factores, μ e k :

$$\mu_x = 0{,}89 \times (2 \times 1{,}8 - 4) + \left[\frac{2100 - 1749}{1749}\right] = -0{,}16$$

$$k_x = 1 - \frac{-0{,}16 \times 208{,}5 \times 10^3}{0{,}74\ \times 12500 \times 235} = 1{,}02$$

$$\mu_y = 1{,}10 \times (2 \times 1{,}78 - 4) + \left[\frac{1480 - 1330}{1330}\right] = -0{,}37$$

$$k_y = 1 - \frac{-0{,}37 \times 208{,}5 \times 10^3}{0{,}6 \ \times 12500 \times 235} = 1{,}04$$

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_{min}\ A\ \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_{xx}\ M_{x.Sd}}{W_{pl.x}\frac{f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_{yy}\ M_{y.Sd}}{W_{pl.y}\frac{f_y}{\gamma_{M1}}} < 1$$

Sendo assim e com $\gamma_{M1} = 1{,}33$ (de acordo com as normas F.E.M e para o caso de solicitação II, a tensão de cedência do material deve ser dividida por um factor de segurança de 1,33) temos,

$$\frac{208{,}5 \times 10^3}{0{,}6 \times 12500\ \times \frac{235}{1{,}33}} + \frac{1{,}02 \times 103{,}8 \times 10^6}{2100 \times 10^3 \times \frac{235}{1{,}33}} + \frac{1{,}04 \times 46{,}3 \times 10^6}{1480 \times 10^3 \times \frac{235}{1{,}33}} = 0{,}63 < 1$$

Resistência do perfil verificada.

Resistência a torção

No caso de elementos sujeitos a torção em que as deformações de distorção poderão ser ignoradas, o valor de cálculo do momento torsor actuante T_{Ed} em cada secção transversal deverá satisfazer a condição (6.2.7 do EC3),

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd}} \leq 1{,}0$$

Para secções de parede fina, e segundo a *1ª Fórmula de Bredt*, as tensões tangenciais τ serão dadas por, (admitindo que τ é constante ao longo da espessura)

$$\tau = \frac{T}{2\ A\ t}$$

Onde, T é o momento torsor, A a área media da secção e t a espessura.

Para o limiar da plastificação, a tensão de corte máxima segundo o critério de *Von Mises* é dada por,

$$\tau_{máx} = \frac{\sigma_{ced}}{\sqrt{3}} = \frac{235}{\sqrt{3}} = 135{,}7\ Mpa$$

Então o momento torsor resistente T_{Rd} será dado por,

$$T_{Rd} = \tau_{máx} \times 2 \times (b - t) \times (h - t) \times t =$$
$$= 135{,}7 \times 2 \times (300 - 8) \times (500 - 8) \times 8 = 311{,}9\ kN.m$$

É na secção 13 para a posição $P7$ do carro guincho, onde se verifica o maior valor do momento torsor $M_{sd.y} = T_{Ed} = 5{,}5\ kN.m$, sendo assim e de acordo com o calculado atrás deverá verificar-se o seguinte.

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd}} = \frac{5{,}5}{311{,}9} = 0{,}02 \leq 1{,}0\ \ Condição\ verificada$$

Resistência ao Esforço Transverso - Secção 13 com $P10$

No caso de uma combinação de esforço transverso e momento torsor, o valor de cálculo do esforço transverso resistente plástico com torção devera ser reduzido de $V_{pl,Rd}$ para $V_{pl,T,Rd}$ e o valor de cálculo do esforço transverso actuante deverá satisfazer a condição (6.2.6 do EC 3):

$$\frac{V_{sd}}{V_{pl,T,Rd}} \leq 1{,}0$$

Onde, $V_{pl,T,Rd}$ para uma secção tubular é dado por (6.2.7 do EC 3),

$$V_{pl,T,Rd} = \left[1 - \frac{\tau_{t,sd}}{\left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)/\gamma_{M0}}\right] V_{pl,Rd}$$

A área de corte para um perfil tubular é dada por,

Carga paralela à largura:

$$A_{V1} = \frac{A\ b}{(b+h)} = \frac{12500 \times 300}{(300+500)} = 4687{,}5\ mm^2$$

Carga paralela à altura:

$$A_{V2} = \frac{A\ h}{(b+h)} = \frac{12500 \times 500}{(300+500)} = 7812{,}5\ mm^2$$

Então,

$$V_{pl,Rd,x-z} = \frac{A_{V1}\left(f_y/\sqrt{3}\right)}{\delta_{M0}} = \frac{4687{,}5 \times \left(235/\sqrt{3}\right)}{1{,}33} = 478{,}2kN$$

$$V_{pl,Rd,y-z} = \frac{A_{V2}\left(f_y/\sqrt{3}\right)}{\delta_{M0}} = \frac{7812{,}5 \times \left(235/\sqrt{3}\right)}{1{,}33} = 797\ kN$$

A tensão tangencial é dada por,

$$\tau_{t,sd} = \frac{M_{sd.z}}{2 \times (b-t) \times (h-t) \times t} = \frac{3{,}8 \times 10^6}{2298{,}6 \times 10^3} = 1{,}6\ Mpa$$

Está-se agora em condições de calcular $V_{pl,T,Rd}$,

$$V_{pl,T,Rd} = \left[1 - \frac{\tau_{t,sd}}{\left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)/\gamma_{M0}}\right] V_{pl,Rd}$$

$$V_{pl,T,Rd,x-z} = \left[1 - \frac{1{,}6}{\left(\frac{235}{\sqrt{3}}\right)/1{,}33}\right] 478{,}2 = 471{,}7\ kN$$

$$V_{pl,T,Rd,y-z} = \left[1 - \frac{1{,}6}{\left(\frac{235}{\sqrt{3}}\right)/1{,}33}\right] 797 = 784{,}5\ kN$$

$$\frac{V_{sd,x-z}}{V_{pl,T,Rd,x-z}} = \frac{27{,}6}{471{,}7} = 0{,}06 \leq 1{,}0 \quad Condição\ verificada.$$

$$\frac{V_{sd,y-z}}{V_{pl,T,Rd,y-z}} = \frac{11{,}5}{784{,}5} = 0{,}02 \leq 1{,}0 \quad Condição\ verificada.$$

Quando da verificação da resistência à flexão é que se deve averiguar se há necessidade de reduzir o momento flector resistente ou não. Se o valor de cálculo do esforço cortante for inferior a 50% do esforço cortante resistente não há lugar a qualquer redução. Neste caso,

$$\frac{V_{sd,x-z}}{V_{pl,T,Rd,x-z}} = \frac{27{,}6}{471{,}7} = 0{,}06 \leq 0{,}5 \quad Condição\ verificada.$$

$$\frac{V_{sd,y-z}}{V_{pl,T,Rd,y-z}} = \frac{11{,}5}{784{,}5} = 0{,}02 \leq 0{,}5 \quad Condição\ verificada.$$

e portanto o efeito do esforço transverso sobre o momento flector resistente pode ser desprezado (6.2.8 do EC3).

Nota: Apesar de existirem, para outras posições do carro guincho esforços transversos superiores ($V_{sd,x-z}$ ou $V_{sd,y-z}$), não se justifica fazer a verificação pois estes são muito reduzidos, quando comparados com valor resistente, como de resto se pode verificar pelos cálculos acima.

Resistência à encurvadura local da alma por esforço transverso

De acordo com o ponto 5.4.6 (7) do EC 3:

$$\frac{d}{t} = \frac{476}{8} = 59{,}5 < 69\varepsilon = 69$$

Logo não é necessária a verificação à encurvadura local da alma.

5.6.6. Carros Laterais C13 e C14

O caso mais crítico verifica-se para a viga $C13$ secção 2, para a posição P_1 do carro guincho.

Tabela 5.18 – Esforços na secção crítica (Carros Laterais C13 e C14)

Secção 2, posição P1
$N_{Sd} = 43{,}8\ kN\ (C)$
$V_{sd.x-y} = -0{,}4\ kN$
$V_{Sd.x-z} = -339\ kN$
$M_{Sd.x} = 0\ kN.m$
$M_{Sd.y} = -203{,}6\ kN.m$
$M_{Sd.z} = -0{,}3\ kN.m$

Secção – HEB 360

Tabela 5.19 – Propriedades da secção

Propriedade	Valor	Unidade
m	142	kg/m
b	300	mm
h	360	mm
d	261	mm
t_w	12,5	mm
t_f	22,5	mm
A	18060	mm^2
I_y	$431{,}9 \times 10^6$	mm^4
I_z	$101{,}4 \times 10^6$	mm^4
i_y	154,6	mm
i_z	74,9	mm
$w_{el,y}$	2400×10^3	mm^3
$w_{el,z}$	$676{,}1 \times 10^3$	mm^3
$w_{pl,y}$	2683×10^3	mm^3
$w_{pl,z}$	1032×10^3	mm^3
I_w	2883×10^9	mm^6
I_t	$2292{,}5 \times 10^4$	mm^4

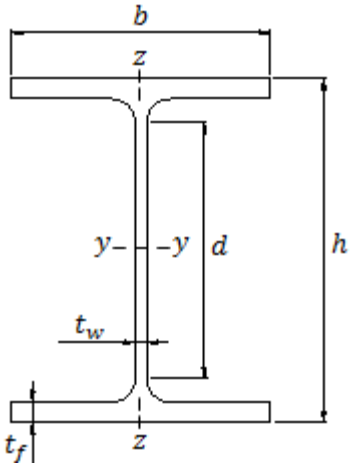


Figura 5.47 – Secção HEB

Classificação da secção

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/235} = 1$$

- <u>Alma</u>

$$\xi \times t_w \times f_y = N_{Sd}$$

$$\xi \times 12{,}5 \times 235 = 43{,}8 \times 10^3 \Rightarrow \xi = 14{,}9\ mm$$

$$\left(\frac{d}{2} + \frac{\xi}{2}\right) = \alpha \times d;\ \left(\frac{261}{2} + \frac{114{,}9}{2}\right) = \alpha \times 261 \Rightarrow \alpha = 0{,}53$$

$$\frac{d}{t_w} = \frac{261}{12{,}5} = 20{,}9 \leq \frac{396\ \varepsilon}{13\alpha - 1} = \frac{396}{13 \times 0{,}53 - 1} = 67{,}2$$

- <u>Banzo</u>

$$\xi \times t_f \times f_y = N_{Sd}$$

$$\xi \times 22{,}5 \times 235 = 43{,}8 \times 10^3 \Rightarrow \xi = 8{,}3\ mm$$

$$\left(\frac{c}{2} + \frac{\xi}{2}\right) = \alpha \times c;\ \left(\frac{143{,}8}{2} + \frac{8{,}3}{2}\right) = \alpha \times 143{,}8 \Rightarrow \alpha = 0{,}53$$

$$\frac{c}{t_f} = \frac{143{,}8}{22{,}5} = 6{,}4 \leq \frac{9\ \varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}} = \frac{9 \times 1}{0{,}53 \times \sqrt{0{,}53}} = 23{,}3$$

Classe 1

Então o HEB é da classe 1.

Resistência à flexão composta com compressão

Os elementos com secções transversais das classes 1 e 2 sujeitas a uma combinação de flexão e compressão devem satisfazer a condição (5.5.4 (1) do EC 3):

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_{min}\ A\ \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_y\ M_{y.Sd}}{W_{pl.y}\frac{f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_z\ M_{z.Sd}}{W_{pl.z}\frac{f_y}{\gamma_{M1}}} < 1$$

com,

$$k_y = 1 - \frac{\mu_x \times N_{Sd}}{\chi_y\ \times A \times f_y}\ mas\ k_y \leq 1{,}5$$

$$\mu_x = \bar{\lambda}_y \times \left(2 \times \beta_{M.y} - 4\right) + \left[\frac{W_{pl,y} - W_{el,y}}{W_{el,y}}\right]\ mas\ \mu_y \leq 0{,}9$$

$$k_z = 1 - \frac{\mu_z \times N_{Sd}}{\chi_z\ \times A \times f_y}\ mas\ k_z \leq 1{,}5$$

$$\mu_z = \bar{\lambda}_z \times (2 \times \beta_{M.z} - 4) + \left[\frac{W_{pl.z} - W_{el.z}}{W_{el.z}}\right] \; mas \; \mu_z \leq 0{,}9$$

χ_{min} é o menor de χ_y e χ_z

Determinação do coeficiente de redução de encurvadura χ ,

$$\chi_i = \frac{1}{\phi_i + \sqrt{\phi_i{}^2 - \bar{\lambda}_i{}^2}}$$

onde,

$$\phi_{\mathrm{i}} = 0{,}5 \times \left[1 + \alpha_i \times \left(\bar{\lambda}_i - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}_i{}^2\right]$$

$\bar{\lambda}_i$ é a esbelteza normalizada

O comprimento de encurvadura (l_e), segundo o eixo dos y-y e z-z foi considerado como sendo igual ao comprimento total do carro $l_{e,y} = l_{e,z} = 4000\ mm$.

- Determinação do coeficiente de redução de encurvadura no eixo y-y

$$\phi_y = 0{,}5 \times \left[1 + \alpha_y \times \left(\bar{\lambda}_y - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}_y{}^2\right]$$

onde,

$\alpha = 0{,}34$ Curva *b*, pois $h/b \leq 1{,}2 \; e \; t_f \leq 100$ (6.2 do EC 3)

$$\lambda_1 = \pi\sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi\sqrt{\frac{210000}{235}} = 93{,}9$$

$$\lambda_y = \frac{l_{e,y}}{i_y} = \frac{4000}{154{,}6} = 25{,}9$$

$$\bar{\lambda}_y = \left(\frac{\lambda_y}{\lambda_1}\right)\sqrt{\beta_A} = \frac{25{,}9}{93{,}9} = 0{,}28 \quad (\beta_{\mathrm{A}} = 1, \text{para classe 1,2 ou 3})$$

então,

$$\phi_y = 0{,}5 \times [1 + 0{,}34 \times (0{,}28 - 0{,}2) + 0{,}28^2] = 0{,}55$$

$$\chi_y = \frac{1}{0{,}55 + \sqrt{0{,}55^2 - 0{,}28^2}} = 0{,}98$$

- Determinação do coeficiente de redução de encurvadura no eixo z-z

$$\phi_z = 0{,}5 \times \left[1 + \alpha_z \times \left(\bar{\lambda}_z - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}_z{}^2\right]$$

onde,

$\alpha = 0{,}34$ Curva *b*, pois $h/b \leq 1{,}2 \; e \; t_f \leq 100$ (6.2 do EC 3)

$$\lambda_1 = \pi\sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi\sqrt{\frac{210000}{235}} = 93{,}9$$

$$\lambda_z = \frac{l_{e,z}}{i_z} = \frac{4000}{74{,}9} = 53{,}4$$

$$\bar{\lambda}_z = \left(\frac{\lambda_z}{\lambda_1}\right)\sqrt{\beta_A} = \frac{53{,}4}{93{,}9} = 0{,}67 \quad (\beta_A = 1, \text{para classe 1,2 ou 3})$$

então,

$$\phi_z = 0{,}5 \times [1 + 0{,}34 \times (0{,}67 - 0{,}2) + 0{,}67^2] = 0{,}80$$

$$\chi_z = \frac{1}{0{,}80 + \sqrt{0{,}80^2 - 0{,}67^2}} = 0{,}81$$

Como $\chi_y > \chi_z$ então χ_{min} é $\chi_z = 0{,}81$

- Determinação do factor de momento uniforme equivalente, $\beta_{M.y}$ (fig. 5.5.3 do EC 3)

Figura 5.48 – Distribuição de momentos

$$M_1 = -203{,}6\ kN.m \qquad 0 = \psi \times M_1 \qquad \psi = 0$$

$$\beta_{M\psi} = 1{,}8 - 0{,}7 \times \psi = 1{,}8$$

- Determinação do factor de momento uniforme equivalente, $\beta_{M.z}$ (fig. 5.5.3 do EC 3)

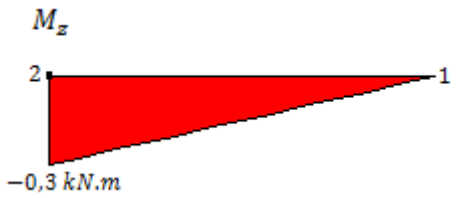


Figura 5.49 – Distribuição de momentos

$$M_1 = -0{,}3\ kN.m \qquad 0 = \psi \times M_1 \qquad \psi = 0$$

$$\beta_{M\psi} = 1{,}8 - 0{,}7 \times \psi = 1{,}8$$

Tem-se agora condições para calcular os factores, μ e k :

$$\mu_y = 0{,}28 \times (2 \times 1{,}8 - 4) + \left[\frac{2683 - 2400}{2400}\right] = 0{,}006$$

$$k_y = 1 - \frac{0{,}006 \times 43{,}8 \times 10^3}{0{,}98 \ \times 18060 \times 235} = 1$$

$$\mu_z = 0{,}67 \times (2 \times 1{,}8 - 4) + \left[\frac{1032 - 676{,}1}{676{,}1}\right] = 0{,}26$$

$$k_z = 1 - \frac{0{,}26 \times 43{,}8 \times 10^3}{0{,}81 \ \times 18060 \times 235} = 1$$

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_{min}\, A\, \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_x\, M_{x.Sd}}{W_{pl.x} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_z\, M_{z.Sd}}{W_{pl.z} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} < 1$$

Sendo assim e com $\gamma_{M1} = 1{,}33$ (de acordo com as normas F.E.M e para o caso de solicitação II, a tensão de cedência do material deve ser dividida por um factor de segurança de 1,33) temos,

$$\frac{43{,}8 \times 10^3}{0{,}81 \times 18060 \ \times \frac{235}{1{,}33}} + \frac{1 \times 203{,}6 \times 10^6}{2683 \times 10^3 \times \frac{235}{1{,}33}} + \frac{1 \times 0{,}3 \times 10^6}{1032 \times 10^3 \times \frac{235}{1{,}33}} = 0{,}45 < 1$$

Resistência do perfil verificada.

Verificação à encurvadura lateral (bambeamento)

Os elementos das classes 1 ou 2 em que o bambeamento seja um modo de ruína potencial devem verificar a seguinte equação (5.5.4 (2) do EC 3).

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_z A\, \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_{LT}\, M_{y.Sd}}{\chi_{LT}\, W_{pl.y} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_z\, M_{z.Sd}}{W_{pl.z} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

onde,

$k_z = 1$, já calculado

$$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT}\, N_{Sd}}{\chi_z\, A\, f_y} \quad mas\ k_{LT} \leq 1$$

$$\mu_{LT} = 0{,}15\, \bar{\lambda}_z\, \beta_{M.LT} - 0{,}15 \quad mas\ \mu_{LT} \ \leq 0{,}9$$

$\beta_{M.LT} = \beta_{M.y} = 1{,}8$, já calculado

$\bar{\lambda}_z$, já calculado

Então,

$$\mu_{LT} = 0{,}15 \ \times 0{,}67 \times 1{,}8 - 0{,}15 = 0{,}031$$

$$k_{LT} = 1 - \frac{0{,}031 \ \times 46{,}5 \times 10^3}{0{,}81 \ \times 18060 \times 235} = 1$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{{\phi_{LT}}^2 - {\bar{\lambda}_{LT}}^2}} \ \ mas \ \chi_{LT} \leq 1{,}0$$

em que,

$$\phi_{LT} = 0{,}5 \times \left[1 + \alpha_{LT} \times \left(\bar{\lambda}_{LT} - 0{,}2\right) + {\bar{\lambda}_{LT}}^2\right]$$

$\alpha_{LT} = 0{,}21$ pois $h/b = 360/300 = 1{,}2 \ \leq 2$ (6.3.2.2 do EC 3)

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{w_{y,pl} \ f_y}{M_{cr}}}$$

Segundo o Anexo F tabela 1.1 do EC 3, e considerando k=1 e k_w =1 e um perfil duplamente simétrico temos $C_1 = 1{,}879$

Pois,

$M_1 = -203{,}6 \ kN.m \quad 0 = \psi \times M_1 \qquad \psi = 0$

O momento critico elástico é dado por,

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E \ I_z}{l_{LT}^2} \sqrt{\frac{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \ I_w + 0{,}039 \ l_{LT}^2 \ I_t}{I_z}}$$

$$= 1{,}879 \times \frac{\pi^2 \times 210 \times 10^3 \times 101{,}4 \times 10^6}{4000^2} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{1}\right)^2 \ \times 2883 \times 10^9 + 0{,}039 \ \times 4000^2 \times 292{,}5 \times 10^4}{101{,}4 \times 10^6}} = 5318{,}3 \ kN.m$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{w_{y,pl} \ f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{2683 \times 10^3 \times \ 235}{5318{,}3 \times 10^6}} = 0{,}34$$

Pode-se agora calcular o ϕ_{LT} e χ_{LT},

$$\phi_{LT} = 0{,}5 \times [1 + 0{,}21 \times (0{,}34 - 0{,}2) + 0{,}34^2] = 0{,}57$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0{,}57 + \sqrt{0{,}57^2 - 0{,}34^2}} = 0{,}97$$

Então calcula-se,

$$\frac{43{,}8 \times 10^3}{0{,}81 \times 18060 \times \frac{235}{1{,}33}} + \frac{1 \times\ 203{,}6 \times 10^6}{0{,}97 \times 2683 \times 10^3 \times \frac{235}{1{,}33}} + \frac{1 \times 0{,}3 \times 10^6}{1032 \times 10^3 \times \frac{235}{1{,}33}} =$$

$$= 0{,}46 \leq 1$$

Resistência do perfil verificada.

Resistência ao Esforço Transverso

Para a secção 1, o esforço de corte é elevado e como tal é necessário verificar se existe redução do momento flector resistente, mas antes deverá verificar-se o seguinte (6.2.6 do EC 3):

$$\frac{V_{sd}}{V_{pl,T,Rd}} \leq 1{,}0$$

A área de corte, para secções laminadas em H e carga paralela á alma é dada por,

$$A_{V1} = A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f =$$

$$= 18060 - 2 \times 300 \times 22{,}5 + (12{,}5 + 2 \times 27) \times 22{,}5 = 6056{,}3 \text{ mm}^2$$

Para a carga paralela ao banzo,

$$A_{V2} = 2bt_f = 2 \times 300 \times 22{,}5 = 13500 \text{ mm}^2$$

O valor do esforço transverso resistente plástico é dado por,

$$V_{pl,Rd,x-z} = \frac{A_{V1}\left(f_y/\sqrt{3}\right)}{\delta_{M0}} = \frac{6056{,}3 \times \left(235/\sqrt{3}\right)}{1{,}33} = 617{,}5\ kN$$

$$V_{pl,Rd,x-y} = \frac{A_{V2}\left(f_y/\sqrt{3}\right)}{\delta_{M0}} = \frac{13500 \times \left(235/\sqrt{3}\right)}{1{,}33} = 1377{,}2\ kN$$

Então,

$$\frac{V_{sd,x-z}}{V_{pl,Rd,x-z}} = \frac{339}{617{,}5} = 0{,}55 \leq 1\ mas \geq 0{,}5$$

Sendo assim o efeito do esforço transverso sobre o momento flector resistente não pode ser desprezado (6.2.8 do EC 3).

$$\frac{V_{sd,x-y}}{V_{pl,Rd,x-y}} = \frac{0{,}4}{1377{,}2} = 0{,}0003 \leq 1\ e\ 0{,}5$$

Nota: Apesar de existirem, para outras posições do carro guincho esforços transversos superiores ($V_{sd,x-y}$), não se justifica fazer a verificação pois estes são muito reduzidos, quando comparados com valor resistente, como de resto se pode verificar pelos cálculos acima.

Momento Flector e Esforço Transverso

Segundo o EC3 quando V_{sd} excede 50% de $V_{pl,Rd}$, o valor de cálculo do momento resistente da secção transversal deve ser reduzido para $M_{V,rd}$, valor de cálculo reduzido do momento resistente plástico tendo em conta o esforço transverso. Então deverá verificar-se as seguintes condições (6.2.8 do EC3),

$$M_{sd} \leq M_{V,y,rd}$$

$$M_{V,y,rd} \leq M_{c,rd}$$

$$M_{V,y,rd} = \frac{\left(W_{pl,y} - \frac{\rho\, A_{V1}^2}{4\, t_w}\right) f_y}{\gamma_{M0}}$$

Em que,

$$\rho = \left(\frac{2\, V_{sd,x-z}}{V_{pl,rd}} - 1\right)^2 = \left(\frac{2 \times 339}{617{,}5} - 1\right)^2 = 0{,}0095$$

Então,

$$M_{V,y,rd} = \frac{\left(2683 \times 10^3 - \frac{0{,}0095 \times 6056{,}3^2}{4\ \times 12{,}5}\right) \times 235}{1{,}33} = 472{,}8\ kN.m$$

O valor de cálculo do momento flector resistente da secção transversal é da do por,

$$M_{c,rd} = \frac{W_{pl}\, f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2683 \times 10^3 \times\ 235}{1{,}33} = 474{,}1\ kN.m$$

Sendo assim tem-se,

$$203{,}6\ kN.m \leq 472{,}8\ kN.m$$

$$472{,}8\ kN.m \leq 474{,}1\ kN.m$$

Resistência verificada.

Interacção entre Esforço Transverso, Momento Flector e Esforço Axial

Se V_{sd} exceder 50% de $V_{ba,rd}$(valor do esforço transverso resistente a encurvadura), a resistência de cálculo da secção transversal ao momento flector e ao esforço axial tem de ser reduzida para ter em conta o esforço transverso (5.6.7 do EC 3):

O $V_{ba,rd}$, valor de resistência a encurvadura por esforço transverso é dado por,

$$V_{ba,rd} = \frac{d\ t_w \tau_{ba}}{\gamma_{M1}}$$

Em que τ_{ba}, resistência pós-encurvadura ao corte é dado em função de,

$$\overline{\lambda}_w = \frac{d/t_w}{37{,}4\ \varepsilon\ \sqrt{k_\tau}} = \frac{261/12{,}5}{37{,}4 \times\ 1 \times \sqrt{5{,}34}} = 0{,}24$$

O valor de $k_\tau = 5{,}34$ pois não existem reforços transversais intermédios. Como $\overline{\lambda}_w \leq 0{,}8$ então,

$$\tau_{ba} = \frac{f_{yw}}{\sqrt{3}} = \frac{235}{\sqrt{3}} = 135{,}7\ Mpa$$

$$V_{ba,rd} = \frac{d\ t_w \tau_{ba}}{\gamma_{M1}} = \frac{261 \times\ 12{,}5 \times 135{,}7}{1{,}33} = 402{,}5\ kN$$

Então,

$$\frac{V_{sd,x-z}}{V_{ba,rd}} = \frac{339}{402{,}5} = 0{,}84 \geq 0{,}5$$

Como $V_{sd,x-z} \geq 0{,}5 \times V_{ba,rd}$, deve verificar-se,

$$M_{sd,y} \leq M_{f,rd} + (M_{pl,rd,y} + M_{f,rd}) \left[1 - \left(\frac{2\ V_{sd,x-z}}{V_{ba,rd}} - 1\right)\right]$$

Como existe esforço axial, os valores de $M_{f,rd}$ e $M_{pl,rd,y}$devem ser reduzidos.

$$n = \frac{N_{sd}}{N_{pl,Rd}} = \frac{43{,}8 \times 10^3}{A\,\frac{f_y}{\gamma_{M0}}} = \frac{43{,}8 \times 10^3}{18060 \times \frac{235}{1{,}33}} = 0{,}01 < 0{,}2$$

Então o valor de $M_{f,rd}$ e $M_{pl,rd,y}$ não terão de ser reduzido.

O momento resistente plástico é dado por,

$$M_{pl,rd,y} = \frac{W_{pl.rd,y}\, f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2683 \times 10^3 \times\ 235}{1{,}33} = 474{,}1\ kN.m$$

O momento resistente plástico da secção constituída apenas pelos banzos é dada por,

$$M_{f,rd} = \frac{2bt_f\left(\frac{h-t_f}{2}\right)f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2 \times 300 \times 22{,}5\left(\frac{360-22{,}5}{2}\right) \times 235}{1{,}33} = 402{,}5\ kN.m$$

Verifica-se então,

$$203{,}6 \times 10^6 \leq 402{,}5 \times 10^6 + (474{,}1 \times 10^6 + 402{,}5 \times 10^6) \times$$
$$\times \left[1 - \left(\frac{2 \times 374{,}9 \times 10^3}{402{,}5 \times 10^3} - 1\right)^2\right] = 625{,}7 \times 10^6$$

Resistência verificada.

Resistência à encurvadura local da alma por esforço transverso

De acordo com o ponto 5.4.6 (7) do EC 3:

$$\frac{d}{t_w} = \frac{261}{12{,}5} = 20{,}9 < 69\varepsilon = 69$$

Logo não é necessária a verificação à encurvadura local da alma.

5.7. Verificação do Estado Limite de Utilização

Na verificação do Estado Limite de Utilização considera-se as mesmas posições para o carro guincho. O estado limite de utilização estabelece os limites à deformação das peças das estruturas e portanto à deformação global da própria estrutura.

De salientar que para a verificação do estado limite de utilização, não são usados coeficientes de majoração.

De acordo com a referência (7), do *Centre Suice de la Construction Métalique*, as flechas admissíveis máximas são dadas por:

As flechas limites Verticais em Pórticos Rolantes são dados por:

Peso do carro + Carga Nominal

$$z_{máx} < \frac{l}{800} = \frac{13000}{800} = 16{,}25\ mm$$

Peso do carro + Carga Nominal+ Peso Próprio

$$z_{máx} < \frac{l}{500} = \frac{13000}{500} = 26\ mm$$

As flechas limites Horizontais em Pórticos Rolantes são dados por:

$$x_{máx}, y_{máx} < \frac{h}{500} = \frac{9000}{500} = 18\ mm$$

De seguida apresentam-se as deformadas para as posições mais críticas, do carro-guincho, ou seja aquelas que conduzem as flechas mais elevadas.

Carro-Guincho na Posição P_1

Tabela 5.20 – Verificação do Estado Limite de Utilização (Todas as solicitações)

	Pontos críticos	$d_x(mm)$	$d_y(mm)$	$d_z(mm)$
Pilares	7	-10,618	9,41	-1,893

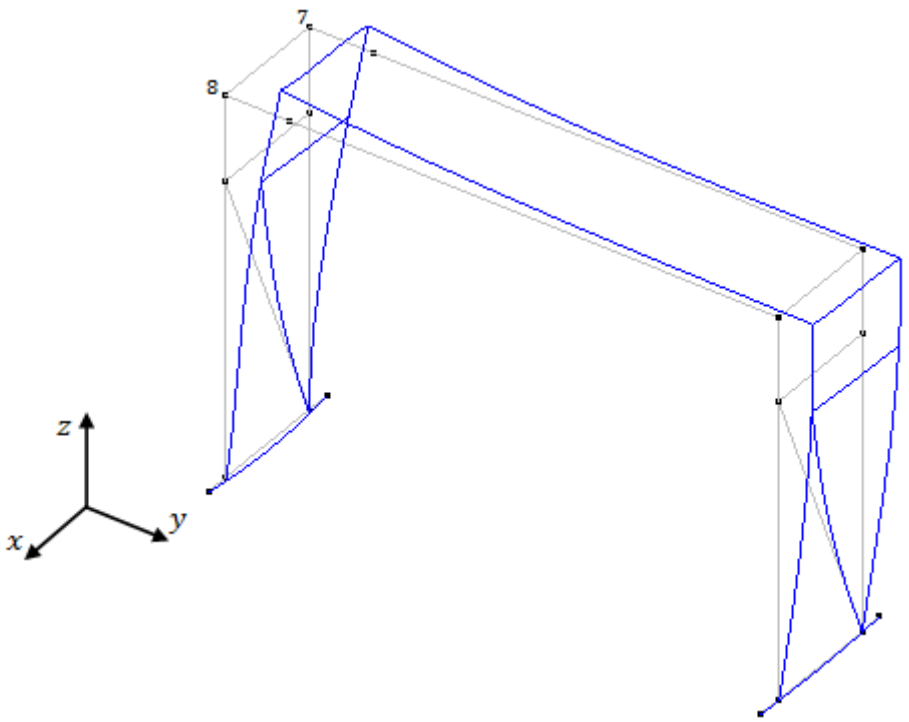


Figura 5.50 – Deformada do Pórtico – Rolante (Todas as solicitações)

Carro-Guincho na Posição P_7

Tabela 5.21 – Verificação do ELU (Cargas Verticais - Peso do Carro + Carga Nominal)

	Pontos críticos	$d_x(mm)$	$d_y(mm)$	$d_z(mm)$
Viga Caixão	11-12	-0,660	-0,001	-12,680

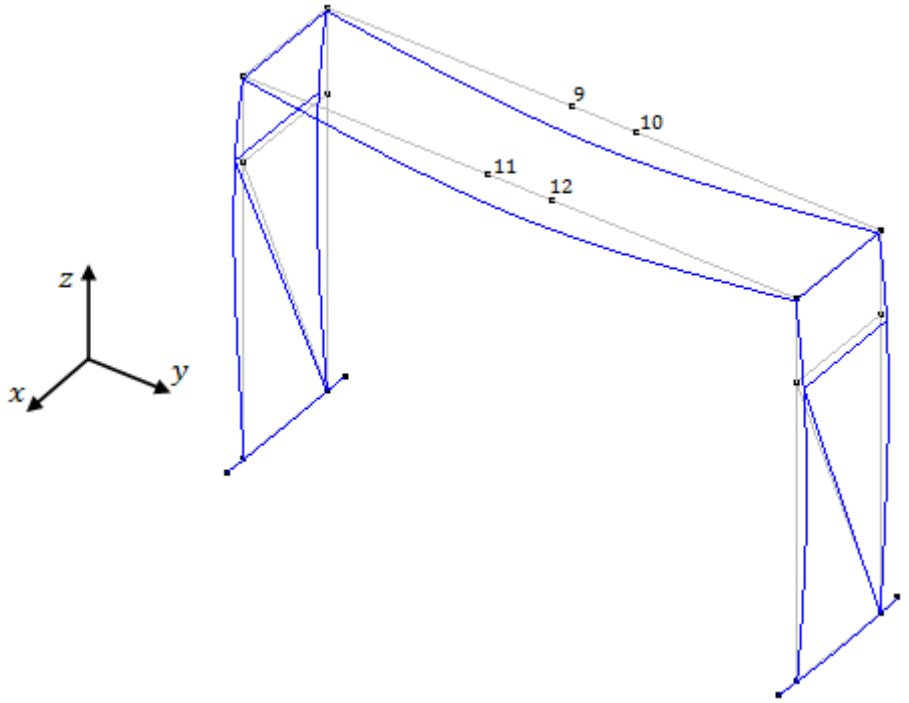


Figura 5.51 – Deformada do Pórtico – Rolante (Cargas Verticais - Peso do Carro + Carga Nominal)

Tabela 5.22 – Verificação do Estado Limite de Utilização (Todas as solicitações)

	Pontos críticos	$d_x(mm)$	$d_y(mm)$	$d_z(mm)$
Viga Caixão	11-12	-5,703	8,220	-13,589
Pilares	16	-3,692	11,383	-0,667

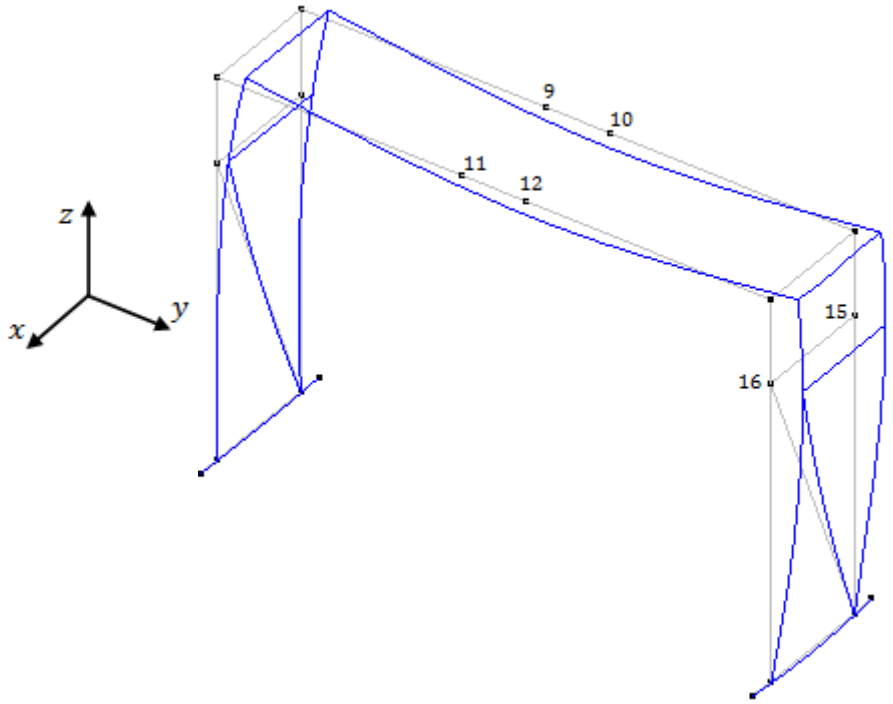


Figura 5.52 - Deformada do Pórtico – Rolante (Todas as solicitações)

De acordo com os resultados acima, o estado limite de utilização esta verificado.

6. Dimensionamento dos Elementos Mecânicos

Dimensionada a estrutura pórtico, segue-se o dimensionamento dos restantes elementos, nos quais se incluem os blocos de rodas e moto-redutores.

6.1. Dimensionamento das Rodas

O dimensionamento das rodas foi efectuado com recurso ao catálogo da STAHL (8) (anexo 4). Para tal é necessário conhecer e definir as seguintes características:

a) Carga máxima nas rodas

Na tabela abaixo tem-se as cargas máximas e mínimas nas rodas, que não são mais que as reacções nos apoios retiradas do programa de análise estrutural *Multiframe*.

Foi considerada a aplicação de motores nas quatro rodas. De salientar e de acordo com as normas FEM (4.2.4.1.1), os valores das reacções foram obtidos sem coeficientes de majoração. Nesta tabela apenas se apresentam às reacções para as posições do carro-guincho, que levam as reacções mais elevadas.

Tabela 6.1 – Reacções máximas nas rodas

	$\boldsymbol{Posição\ P_1}$	$\boldsymbol{Posição\ P_7}$
$\boldsymbol{R_x[kN]}$	23,6	16,9
$\boldsymbol{R_y[kN]}$	−6,9	−13,7
$\boldsymbol{R_z\ [kN]}$	288,9	180,9

Tabela 6.2 – Reacções mínimas nas rodas

	$\boldsymbol{Posição\ P_1}$	$\boldsymbol{Posição\ P_7}$
$\boldsymbol{R_z\ [kN]}$	24,2	24,2

Nota: As reacções apresentadas segundo o eixo do x-x são o somatório das reacções para o par de rodas do mesmo carro lateral, foram obtidas não considerando as cargas transversais devido ao rolamento do carro-guincho, e a força do vento foi multiplicada por um factor de 0,8, pois o valor da velocidade do vento é elevado demais para as condições de funcionamento normais. ($V_{Vento} = 72 \times 0{,}8 = 57{,}6\ km/h$, onde os $72\ km/h$ foi a velocidade considerada para o dimensionamento da estrutura pórtico, mas manifestamente elevada para as condições de trabalho normais).

De acordo coma norma e o catálogo da STAHL, a carga a utilizar para a escolha das rodas é dada por,

$$R_{id} = \frac{R_{min} + 2R_{máx}}{3} = \frac{24{,}2 + 2 \times 288{,}9}{3} = 200{,}7\ kN$$

b) Classificação do Grupo dos Elementos Mecânicos

De acordo com o definido anteriormente, o grupo segundo a norma F.EM, dos elementos mecânicos é o **1Am**.

c) Velocidade do Pórtico

A velocidade do pórtico já foi definida, como sendo igual a $V_P = 40\ m/min$.

d) Tipo e dimensões do Carril

De acordo a empresa *Gantrail* (8) (produtora de carris), a largura cheia do carril pode ser determinada considerando uma largura de $2{,}5\ mm$ por tonelada,

Então tem-se,

$$k_e = 2{,}5 \times \frac{200{,}7 \times 10^3}{9{,}81 \times 10^3} = 51{,}2\ mm$$

Da tabela abaixo escolhe-se o tipo de carril.

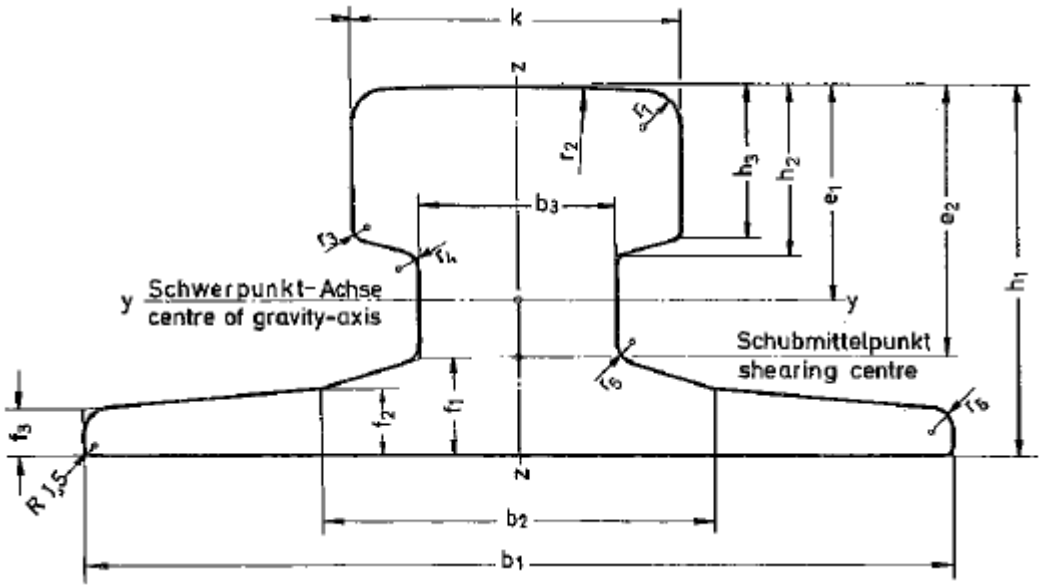


Tabela 6.3 – Dimensões do carril DIN 536

Tabela 6.4 – Dimensões dos carris DIN 536

Nenn-größe size	Abmessungen - dimensions (mm)										
	k	b_1	b_2	b_3	f_1	f_2	f_3	h_1	h_2	h_3	r_1
A 45	45	125	54	24	14,5	11	8	55	24	20	4
A 55	55	150	66	31	17,5	12,5	9	65	28,5	25	5
A 65	65	175	78	38	20	14	10	75	34	30	6
A 75	75	200	90	45	22	15,4	11	85	39,5	35	8
A 100	100		100	60	23	16,5	12	95	45,5	40	
A 120	120	220	120	72	30	20	14	105	55,5	47,5	10
A 150	150		-	80	31,5	-		150	64,5	50	

De acordo com a tabela acima, escolhe-se um carril do tipo **A75**, uma vez que este apresenta uma largura efectiva de contacto entre a roda e o carril de $k_{eff} = k - 2r_1 = 75 - 2 \times 8 = 59\ mm > k_e = 51{,}2$. Um outro factor que determinou a escolha deste carril, prende-se com o facto de aquando da escolha das rodas, estas serem determinadas com base no k_{eff}, como de resto se pode verificar na tabela abaixo.

Escolha das Rodas

Uma vez definidas as características necessárias á escolha das rodas, e de acordo com o catálogo da empresa STAHL, tem-se a seguinte tabela.

Tabela 6.5 – Carga admissível por roda (**SR-E-400**)

Zulässige Radlast (max.) *1 Permissible wheel load (max.) *1 Charge adm. par galet (max.) *1	Einstufung nach FEM (ISO) Classification to FEM (ISO) Classification selon FEM (ISO)	Schienenkopfbreite *2 Railhead width *2 Largeur du champignon *2	Zulässige ideelle Radlasten $R_{id\ zul}$ in [kg] bei Fahrgeschwindigkeit v in [m/min] Permissible ideal wheel loads $R_{id\ zul}$ in [kg] at travel speed v in [m/min] Charges idéelles admissibles par galets $R_{id\ zul}$ en [kg] avec vitesse de direction v						
R_{zul}		k_{eff}	8	12,5	16	20	25	32	40
[kg]		[mm]	[kg]						
30000	1Bm (M3)	60	25900	25350	24900	24450	23950	23300	22600
		70	30000	29550	29100	28550	27950	27150	26400
		80	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000
		100	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000
	1Am (M4)	60	~~23250~~	~~22700~~	~~22350~~	~~21950~~	~~21450~~	~~20850~~	20250
		70	27100	26500	26050	25600	25050	24350	23650
		80	30000	30000	29750	29250	28600	27800	27000
		100	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000

Sendo assim e de acordo com o catálogo da STAHL, serão escolhidas rodas do tipo **SR-E-400** com $400\ mm$ de diâmetro, e com uma capacidade de carga de $R_{id\ zul} = 20250\ kg$. Esta escolha prende-se com o facto de ser necessário verificar as seguintes condições.

$$R_{máx} = 28890 \leq R_{zul} = 30000\ kg$$
$$R_{id} = 20070 < R_{id\ zul} = 20250\ kg$$

Verificação da Reacção Máxima Horizontal

De acordo com o catálogo de onde foram seleccionadas as rodas, a máxima reacção horizontal transversal deverá verificar a seguinte a condição.

$$R_{máx,Transversal} < 20\ \%\ R_{zul} \Rightarrow 1370 < 0{,}2 \times 30000 = 6000\ kg$$

Dimensionamento dos Grampos de Fixação do Carril

Os grampos de fixação são dimensionados para resistir as cargas transversais ao carril ($R_{máx,Transversal} = 13{,}7\ kN$), então e de acordo com a empresa *Gantrail* escolhe-se um grampo de fixação do tipo **9116/08/29** (anexo5) que apresenta uma capacidade de carga horizontal de $55\ kN$.

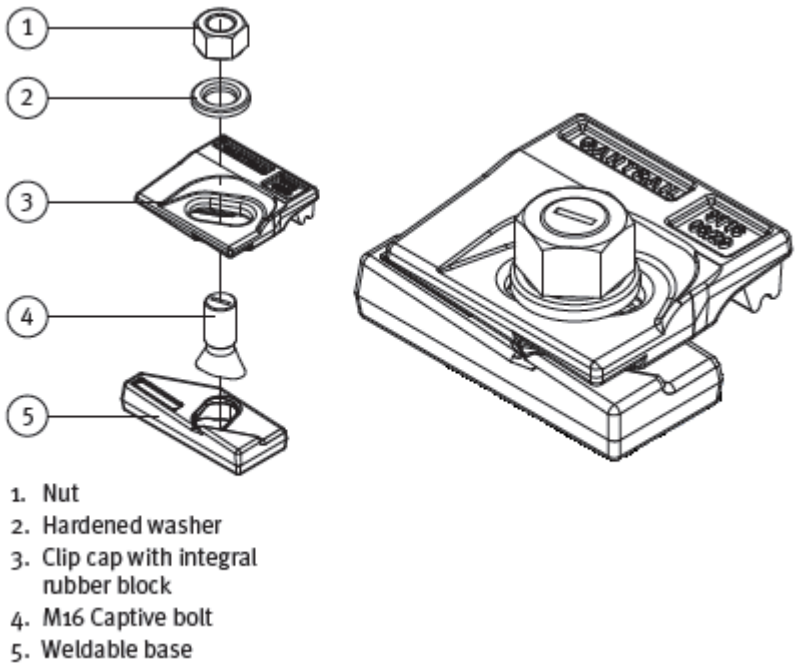


Figura 6.1 – Grampo de Fixação/Componentes **(9)**

O componente número 5 da figura 6.1 é uma base soldável para posterior fixação do grampo, pois o carril ira apoiar numa base metálica com uma largura de 370 mm, base metálica esta que por sua vez é fixada ao betão por meio de chumbadouros. Sobre esta base é soldado o componente número 5, para posterior fixação do parafuso (componente numero 4).

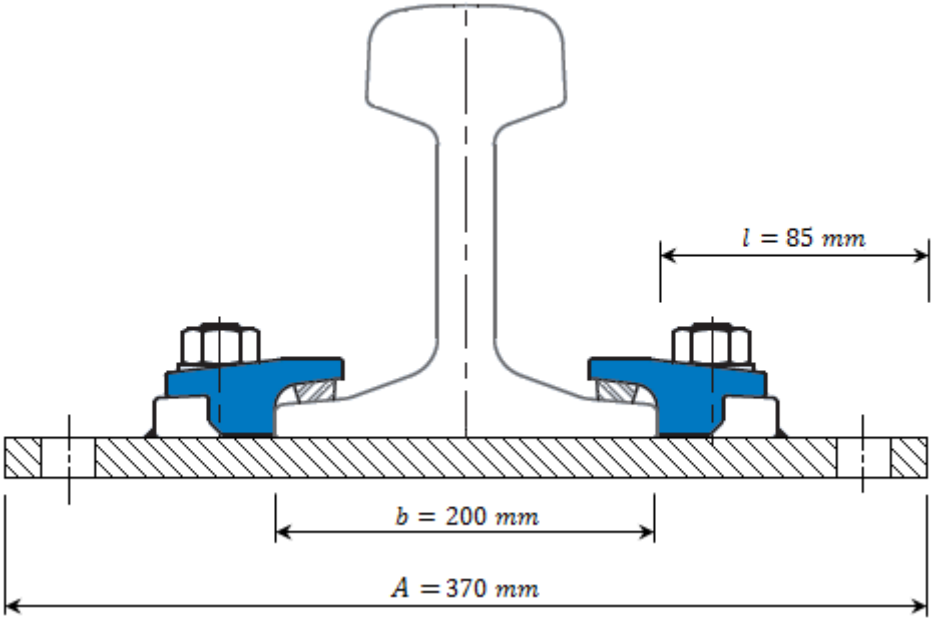


Figura 6.2 – Carril sobre base metálica

Relativamente ao cordão de soldadura do componente 5, este deverá ser soldado por um cordão de 4 mm de espessura de garganta.

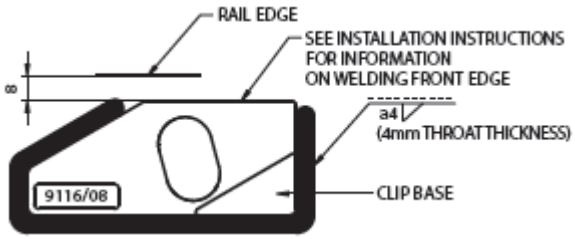


Figura 6.3 – Detalhe do cordão de soldadura **(9)**

Dimensionamento do Betão e Espessura da chapa de base

Para a tensão de compressão na fundação entre a chapa de base e a sapata de betão, deverá verificar-se o seguinte:

Utilizado um betão do tipo C20/25, com uma tensão de ruptura a compressão de $f_{ck} = 20\ N/mm^2$.

$$\frac{N_{Sd}}{S_u} \leq 0{,}7 f_{ck}$$

Onde S_u é á área reduzida da secção.

$$S_u = S - A_f$$

E A_f é a área total da furação. Da expressão anterior resulta:

$$\left(A \times B - n_f \times \frac{\pi D^2}{4}\right) \times 0{,}7 f_{cd} \geq N_{Sd}$$

Onde as dimensões $A\ e\ B$ são dadas nas figuras 6.2 e 6.4.

$$A = 370\ mm, B = 182\ mm$$

Utilizando parafusos M16, tem-se,

$$\left(370 \times 182 - 2 \times \frac{\pi \times 18^2}{4}\right) \times 0{,}7 \times 18{,}7 = 884{,}5\ kN \geq 288{,}9\ kN$$

Betão verificado.

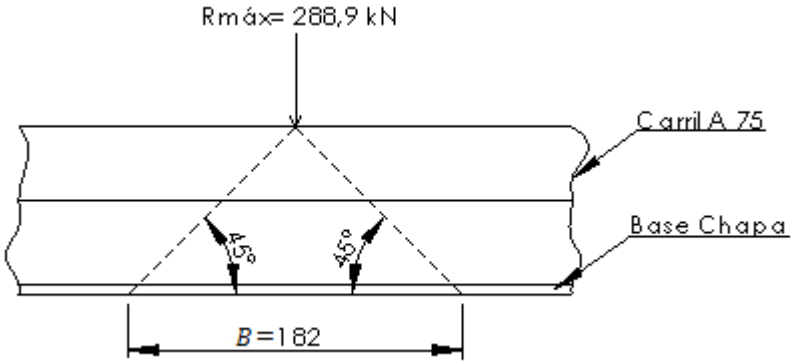


Figura 6.4 – Degradação da carga sobre o trilho

O dimensionamento da espessura da placa pode ser efectuado considerando a flexão de uma viga em balanço, sob acção de uma carga uniformemente distribuída igual à tensão de contacto σ_c.

$$\sigma_c = \frac{N_{Sd}}{A \times B - n_f \times \frac{\pi D^2}{4}}$$

$$\sigma_c = \frac{288{,}9 \times 10^3}{370 \times 182 - 2 \times \frac{\pi \times 18^2}{4}} = 4{,}3\ N/mm^2$$

Considerando uma faixa de 10 mm de espessura, calcula-se o momento máximo na secção crítica,

$$M = \sigma_c b \frac{l^2}{2}$$

$$W = \frac{1}{6} b t^2$$

Em função da tensão resistente do aço S355, é então possível determinar a espessura mínima t,

$$\sigma_f = \frac{M}{W} = \frac{3\sigma_c \times l^2}{t^2} \leq \sigma_{Rd}$$

$$t \geq \sqrt{\frac{3 \times 4{,}3 \times 85^2}{355}} = 16{,}2\ mm$$

Escolhe-se então $t = 18\ mm$.

Dimensionamento dos chumbadouros

Estes chumbadouros serão os elementos de ligação da base metálica na qual assenta o carril, ao betão. Estes apenas estarão solicitados ao corte, gerado pela reacção transversal e longitudinal instalada nas rodas dos carros laterais.

O esforço corte resultante é dado por,

$$V_{resultante} = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} = \sqrt{45{,}6^2 + 7{,}7^2} = 46{,}3\ kN$$

Resistência ao corte (Quadro 6.5.3 do EC 3)

Como dois parafusos trabalham ao corte,

$$F_{v,Rd} = \frac{V_{resultante}}{2} = \frac{0{,}6\ f_{ub}\ A_s}{\gamma_{Mb}} = \frac{0{,}6 \times 400 \times A_s}{1{,}25} \Rightarrow A_s = 120{,}6\ mm^2$$

Escolhe-se então parafusos M16, com uma área $A_s = 157\ mm^2$, classe 4.6.

$$F_{v,Rd} = \frac{0{,}6\ f_{ub}\ A_s}{\gamma_{Mb}} = \frac{0{,}6 \times 400 \times 157 \times 10^{-3}}{1{,}25} = 30{,}1 > \frac{V_{resultante}}{2} = 23{,}2\ kN$$

Resistência verificada.

Resistência ao esmagamento (Quadro 6.5.3 do EC3)

A resistência ao esmagamento, é dada por:

$$F_{b,Rd} = \frac{2{,}5\ \alpha\ f_u d\ t}{\gamma_{Mb}}$$

Em que α, é o menor dos seguintes valores:

$$\frac{e_1}{3\ d_0} = \frac{21}{3 \times 18} = 0{,}39$$

$$\frac{p_1}{3\ d_0} - 0{,}25 = \frac{650}{3 \times 18} - 0{,}25 = 11{,}8$$

$$\frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{600}{360} = 1{,}7$$

1

$t_{min} = 16\ mm$, espessura da chapa de base.

$$F_{b,Rd} = \frac{2{,}5 \times\ 0{,}39 \times 360 \times\ 16 \times 16 \times 10^{-3}}{1{,}25} = 71{,}9\ kN > F_{v,Sd} = 23{,}2\ kN$$

Resistência ao esmagamento verificada.

Espaçamento dos Grampos de Fixação do Carril

De acordo com os catálogos da mesma empresa, esta sugere que para aplicações normais, os grampos sejam espaçados de 650 em 650 mm.

6.2. Escolha do tipo de Moto-Redutor

Para determinar o binário necessário para vencer a carga vertical, efectua-se o cálculo da resistência ao rolamento, então e de acordo com a figura seguinte tem-se.

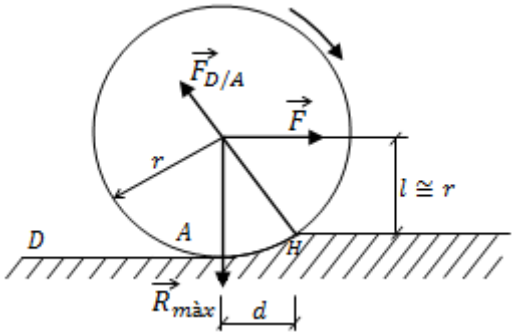


Figura 6.5 – Resistência ao rolamento

Para calcular a intensidade da força que faz rolar a roda, e portanto permite vencer a resistência ao rolamento $F_{D/A}$, é necessário considerar dois momentos calculados em relação a geratriz que passa em H.

- Momento da resistência ao rolamento $= R_{máx} \times d$
- Momento da força motora $= F \times r$

Igualando estes momentos temos:

$$R_{máx} \times d = F \times r \Rightarrow F = R_{máx} \times \frac{d}{r}$$

Onde d é o coeficiente de resistência ao rolamento e, por ser um comprimento exprimisse em metros. Para o caso de análise considera-se $d = 0{,}0005\ m$ (roda de vagão carril).

$$F = R_{máx} \times \frac{d}{r} = 288{,}9 \times \frac{0{,}0005}{0{,}2} = 0{,}72\ kN$$

Á resistência ao rolamento calculada anteriormente, ainda se deverá somar a acção horizontal do Vento e da Inércia a vencer para por o pórtico em movimento. De acordo com o programa de análise estrutural tem-se uma reacção de $R_{x,máx} = 23{,}6\ kN$. O valor desta reacção é dividido por dois, pois teremos dois motores em cada carro lateral.

Então,

$$F_{total} = F + R_{vento+Inércia}/2 = 0{,}72 + 23{,}6/2 = 12{,}6\ kN$$

Potência do Motor

Foi escolhido um motor do catálogo da STAHL (anexo 4), para uma roda com um diâmetro de $400\ mm$. Como já definido anteriormente tem-se que a velocidade a atingir pelo pórtico é de $V_{H,pórtico} = 40\ [m/min]$, o motor escolhido apresenta duas velocidades $10/40\ [m/min]$, devido à bobine ter 2 enrolamentos (ou funciona 1 ou o outro e por isso as velocidades diferentes).

$P = M \times \omega\ [kW]$

Onde,

$M = F_{total} \times r = 12{,}6 \times 10^3 \times 0{,}2 = 2520\ N.m$

$\omega = \frac{V_{H,pórtico}}{r} = \frac{0{,}17}{0{,}2} = 0{,}85\ rad/s$

Em que,

F_{total} - Resistência ao rolamento total

r - Raio da roda ($r = 200\ mm$)

$V_{H,pórtico}$- Velocidade linear ($V_{H,pórtico} = 0{,}17\ m/s$)

A potência do motor é então dada por,

$P = M \times \omega = 2520 \times 0{,}85 = 2{,}2\ kW$

Do catálogo da STAHL escolhe-se um moto-redutor do tipo **SA-C 6730523**, com uma potência de $3{,}2\ kW$.

Resistência ao derrube do Pórtico Rolante

As reacções nos apoios têm todas, sentido positivo na direcção vertical pelo que não é gerado um binário de capaz de provocar o derrube da estrutura. Mesmo quando o pórtico não esta carregado, a força do vento não gera reacções nos apoios negativas, sendo assim a resistência ao derrube esta assegurada, e a geometria do pórtico validada.

7. Dimensionamento das Ligações Aparafusadas

Uma vez dimensionada a estrutura resistente e todos os seus elementos, procede-se de seguida ao dimensionamento das ligações aparafusadas, de acordo com as disposições apresentadas no EC 3. As ligações ao corte apresentadas são da Categoria A – ligações aparafusadas correntes, no que respeita a ligações traccionadas, estas pertencem à Categoria D – ligações com parafusos não pré-esforçados. Consultando o quadro 6.5.3 do EC3, obtêm-se os critérios de resistência adequados para os parafusos.

Para o dimensionamento do nó rígido, (ligação viga resistente – pilar e pilar – carros laterais) segue os pressupostos do Anexo J, do Eurocódigo 3, determinando a resistência do banzo e da placa de testa através da análise de sucessivas flanges T equivalentes, o modelo da flange T é representado na figura 7.1. A resistência global da ligação será função da resistência de cada uma das fiadas de parafusos e do mecanismo de deformação definido, para cada uma dessas fiadas de parafusos.

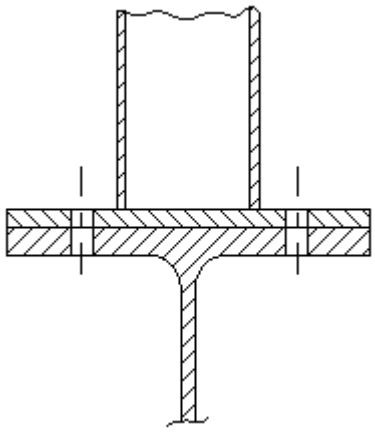


Figura 7.1 – Flange T

Disposição dos furos para os parafusos (6.5 do EC3)

A disposição dos furos dos parafusos, deve ser tal que, facilite a colocação dos parafusos, e também deve obedecer aos limites da validade das regras utilizadas para determinar as resistências de cálculo dos parafusos. As disposições dos parafusos a seguir apresentadas seguem os pressupostos do ponto 6.5.1 (Disposição dos furos para parafusos e rebites) do EC3.

7.1. Ligação viga resistente – pilar

Para a ligação em análise, a posição mais crítica verifica - se para a posição $P7$, onde o momento instalado M_x é maior.

Tabela 7.1 – Valores dos esforços actuantes (Posição ***P7*** do carro guincho)

	Pontos Críticos	N_{sd} $[kN]$	$V_{sd.x-y}$ $[kN]$	$V_{sd.x-z}$ $[kN]$	$V_{sd.y-z}$ $[kN]$	$M_{sd.x}$ $[kN.m]$	$M_{sd.y}$ $[kN.m]$	$M_{sd.z}$ $[kN.m]$
$\boldsymbol{V1}$	13	11,5 (C)	10,6	-	$-134{,}6$	124,3	22,9	$-8{,}6$
$\boldsymbol{P11}$	13	142,7 (C)	-	$-19{,}6$	13,8	$-124{,}3$	32,7	5,5

De acordo com os esforços da tabela acima e tendo em conta o referencial usado tem-se,

$$V_1 = V_{sd,y-z}(P11) = 13{,}8\ kN$$

$$V_2 = V_{sd,x-z}(P11) = 19{,}6\ kN$$

$$V_{resultante} = \sqrt{V^2{}_1 + V^2{}_2} = 24\ kN$$

$$M = M_{sd,x}(V1) = M_{sd,x}(P11) = 124{,}3\ kN.m$$

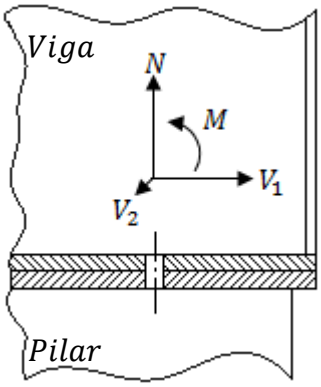


Figura 7.2 – Esforços instalados no parafuso

Considerando-se como eixo de rotação o banzo inferior da viga resistente (ver figura 7.3, assinalado com um ponto), a distribuição dos esforços de tracção nas diferentes fiadas de parafusos (figura 70), é a seguinte.

$$M_{Sd} = F_1 \times x_1 + F_2 \times x_2 + F_3 \times x_3 + F_4 \times x_4 + F_5 \times x_5 + F_6 \times x_6$$

$$= \frac{F_i}{h_i} \times (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + x_5^2 + x_6^2)$$

$$124{,}3 \times 10^3 = \frac{F_i}{x_i} \times (50^2 + 150^2 + 250^2 + 350^2 + 450^2 + 550^2)$$

Tendo em conta figura abaixo temos,

$F_1 = 95{,}6\ kN$ $\qquad$ $F_4 = 43{,}5\ kN$

$F_2 = 78{,}3\ kN$ $\qquad$ $F_5 = 26{,}1\ kN$

$F_3 = 60{,}9\ kN$ $\qquad$ $F_6 = 8{,}7\ kN$

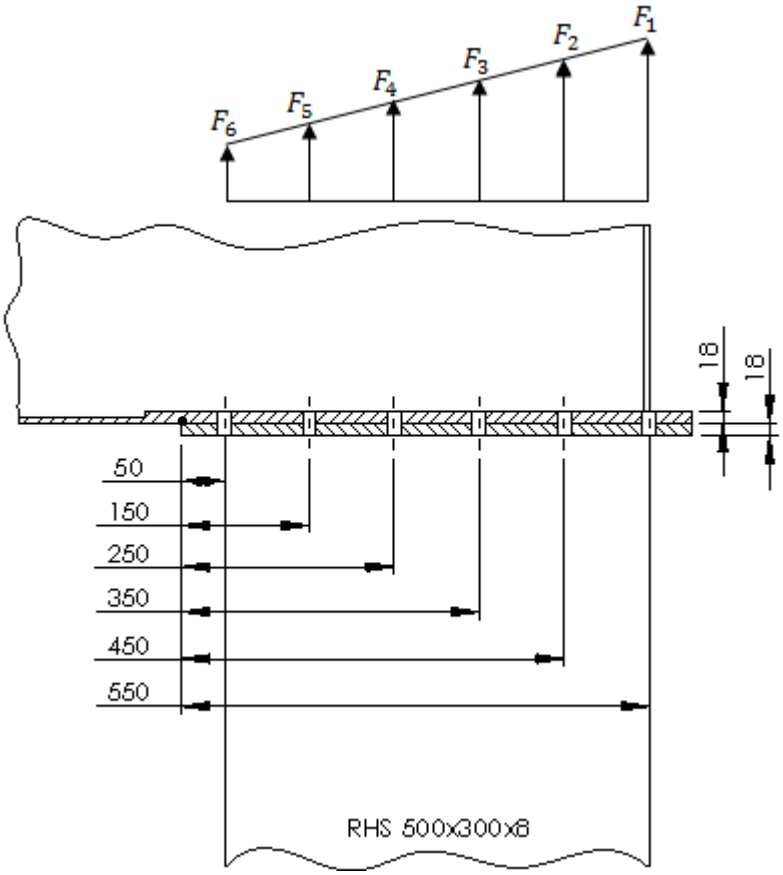


Figura 7.3 – Distribuição de forças do nó rígido

Dimensionamento dos parafusos

Foram escolhidos parafusos M 16, classe 8.8. Com uma tensão de ruptura $f_{ub} = 800\ MPa$, diâmetro dos furos $d_0 = 18\ mm$, diâmetro nominal $d = 16\ mm$, secção resistente a tracção $A_s = 157\ mm^2$.

Considerem-se 12 parafusos da classe 8.8 distribuídos pelas 6 fiadas.

Resistência á tracção (Quadro 6.5.3 do EC 3)

$$F_{t,Rd} = \frac{0{,}9\ f_{ub}\ A_s}{\gamma_{Mb}} = \frac{0{,}9 \times 800 \times 157 \times 10^{-3}}{1{,}25} = 90{,}4\ kN$$

$$F_{t,Rd} > \frac{F_1}{2} = \frac{95{,}6}{2} = 47{,}8\ kN$$

Resistência verificada.

Resistência ao corte (Quadro 6.5.3 do EC 3)

Admitindo que só dois parafusos trabalham ao corte,

$$F_{v,Rd} = \frac{0{,}6\, f_{ub}\, A_s}{\gamma_{Mb}} = \frac{0{,}6 \times 800 \times 157 \times 10^{-3}}{1{,}25} = 60{,}3\ kN$$

$$F_{v,Rd} > \frac{V_{Sd}}{2} = \frac{24}{2} = 12\ kN$$

Resistência verificada.

Resistência dos parafusos a esforços combinados (6.5.5 do EC 3)

Parafusos que estejam simultaneamente sujeitos ao corte e à tracção devem, satisfazer a seguinte condição:

$$\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Sd}}{1{,}4F_{t,Rd}} \leq 1{,}0$$

$$\frac{12}{60{,}3} + \frac{47{,}8}{1{,}4 \times 90{,}4} = 0{,}58 \leq 1{,}0$$

Resistência verificada.

Resistência do banzo da viga resistente

Como já foi referido no dimensionamento do nó rígido é adoptada a metodologia do Anexo J do EC 3 determinando a resistência do banzo da viga resistente e da placa de testa do pilar através da análise de sucessivas flanges T equivalentes.

Utilizando 6 fiadas de parafusos, M16 da classe 8.8.

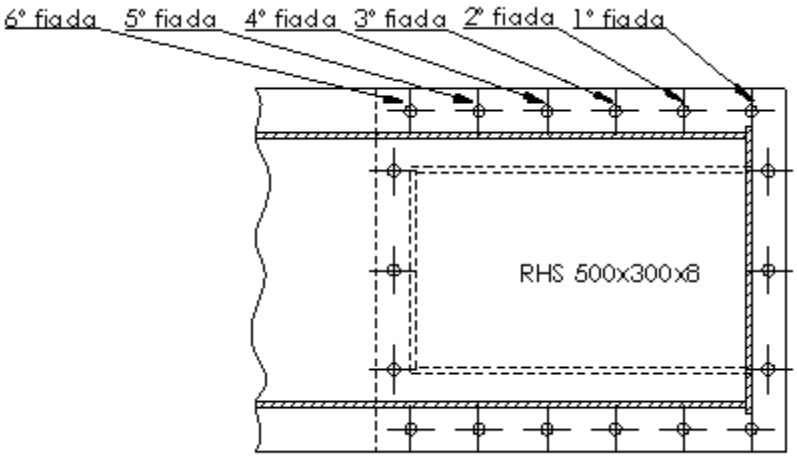


Figura 7.4 – Identificação das fiadas

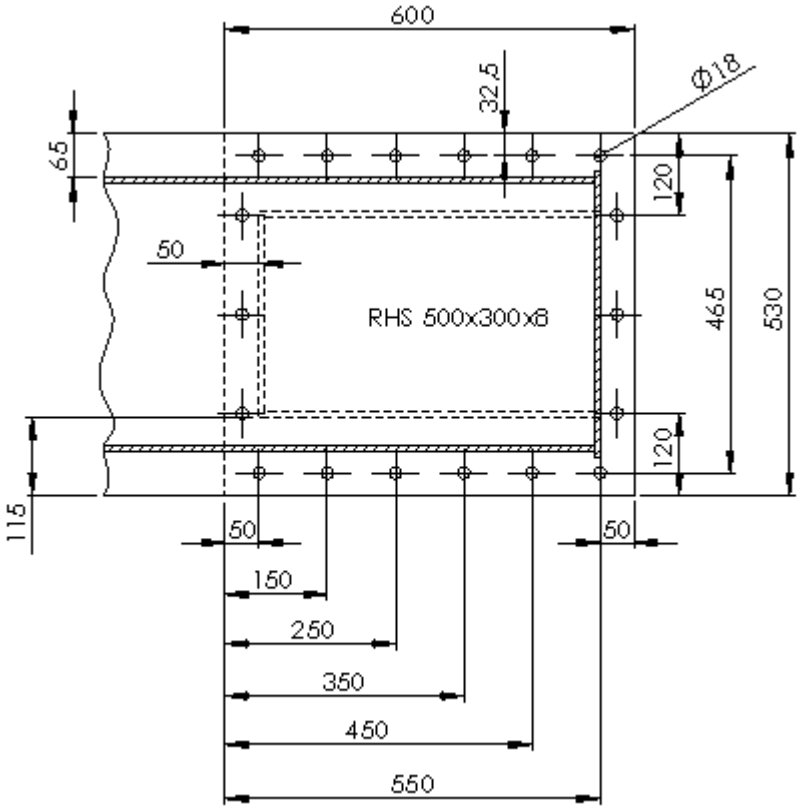


Figura 7.5 – Geometria da ligação

De acordo com à disposição dos furos para os parafusos, estabeleceram-se as seguintes considerações geométricas (onde a é a espessura do cordão de soldadura):

$$e = 32{,}5\ mm$$

$$m = \frac{d}{2} - 0{,}8\ a\sqrt{2} = \frac{65}{2} - 0{,}8\ \times 4{,}5 \times \sqrt{2} = 27{,}4\ mm$$

$$n = \min(e\,;1{,}25 \times m) = 32{,}5\ mm$$

$$\lambda = \frac{n}{m} = \frac{32{,}5}{27{,}4} = 1{,}19$$

$$\frac{2\,\lambda}{2\,\lambda + 1} = \frac{2 \times 1{,}19}{2 \times 1{,}19 + 1} = 0{,}70$$

1ª e 6ª fiada (J.3.4.1 do EC 3)

Para 1ª e 6ª fiada, o comprimento característico l_{eff} é dado pelo menor dos seguintes valores:

Para o caso de fiadas extremas.

$l_{eff,b} = 0{,}5p + 2m + 0{,}625e$

$= 0{,}5 \times 100 + 2 \times 27{,}4 + 0{,}625 \times 32{,}5 = 125{,}1\ mm$

$l_{eff,b} = 4m + 1{,}25e = 4 \times 27{,}4 + 1{,}25 \times 32{,}5 = 150{,}2\ mm$

$l_{eff,b} = 2\pi m = 2 \times \pi \times 27{,}4 = 172{,}2\ mm$

Assim, $l_{eff,b} = 125{,}1\ mm$

O momento plástico é dado pela seguinte expressão,

$$M_{pl\,,Rd} = \frac{t^2\ l_{eff}\ f_y}{4\ \gamma_{M0}} = \frac{18^2 \times 125{,}1 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1{,}1} = 2{,}16\ kN.m$$

Determinação do modo de ruína (figura J.3.3 do EC 3)

$$\beta = \frac{4\ M_{pl\,,Rd}}{m\ \sum F_{t,Rd}}$$

Onde,

$\sum B_{t,Rd}$ – Somatório da resistência à tracção dos parafusos de uma fiada.

Então,

$$\beta = \frac{4\ M_{pl\,,Rd}}{m\ \sum F_{t,Rd}} = \frac{4 \times 2{,}16 \times 10^3}{27{,}4 \times 2 \times 90{,}4} = 1{,}74 > \frac{2\lambda}{2\lambda + 1} = 0{,}70$$

O modo de ruína é o Modo 2 (figura J.3.3 do EC 3). Ruptura dos parafusos, com cedência da placa.

$$F_{t,máx} = \frac{2\ M_{pl\,,Rd} + n\ \sum F_{t,Rd}}{m + n} =$$

$$= \frac{2\ \times 2{,}16 \times 10^3 + 32{,}5 \times 2 \times 90{,}4}{27{,}4 + 32{,}5} = 170{,}2\ kN$$

Desta forma verifica-se que, para a fiada 1 e 6 o esforço máximo suportado pelo banzo da viga resistente é de $F_{t,máx} = 170{,}2\ kN$, sendo que o esforço instalado máximo é de $F_{t,Sd} = 95{,}6\ kN$. Sendo assim a resistência esta assegurada.

2ª, 3ª,4ª e 5ª fiada (J.3.4.1 do EC 3)

Para 2ª,3ª,4ª e 5ª fiada, o comprimento característico l_{eff} é dado pelo menor dos seguintes valores:

Para o caso de fiadas interiores.

$l_{eff,a} = p = 100\ mm$

$l_{eff,a} = 4m + 1{,}25e = 4 \times 27{,}4 + 1{,}25 \times 32{,}5 = 150{,}2\ mm$

$l_{eff,a} = 2\pi m = 2 \times \pi \times 27{,}4 = 172{,}2\ mm$

Assim, $l_{eff,a} = 100\ mm$

O momento plástico é dado pela seguinte expressão,

$$M_{pl\,,Rd} = \frac{t^2\ l_{eff}\ f_y}{4\ \gamma_{M0}} = \frac{18^2 \times 100 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1{,}1} = 1{,}73\ kN.m$$

Determinação do modo de ruína (figura J.3.3 do EC 3)

$$\beta = \frac{4\ M_{pl\,,Rd}}{m\ \sum F_{t,Rd}}$$

Onde,

$\sum B_{t,Rd}$ – Somatório da resistência à tracção dos parafusos de uma fiada.

Então,

$$\beta = \frac{4\ M_{pl\,,Rd}}{m\ \sum F_{t,Rd}} = \frac{4 \times 1{,}73 \times 10^3}{27{,}4 \times 2 \times 90{,}4} = 1{,}39 > \frac{2\lambda}{2\lambda + 1} = 0{,}70$$

O modo de ruína é o Modo 2 (figura J.3.3 do EC 3). Ruptura dos parafusos, com cedência da placa.

$$F_{t,máx} = \frac{2\ M_{pl\,,Rd} + n\ \sum F_{t,Rd}}{m + n} =$$

$$= \frac{2\ \times 1{,}73 \times 10^3 + 32{,}5 \times 2 \times 90{,}4}{27{,}4 + 32{,}5} = 155{,}9\ kN$$

Desta forma verifica-se que, para as fiadas 2,3,4 e 5 o esforço máximo suportado pelo banzo da viga resistente é de $F_{t,máx} = 155{,}9\ kN$, sendo que o esforço instalado máximo é de $F_{t,Sd} = 78{,}3\ kN$. Resistência verificada.

Resistência da placa

Admitamos uma placa testa com, $600 \times 530 \times 18$, soldada ao pilar por meio de um cordão continuo com $a = 5{,}5\ mm$ de garganta.

$e = 32{,}5\ mm$

$m = h - \frac{d}{2} - 0{,}8\ a\sqrt{2} = 115 - \frac{65}{2} - 0{,}8\ \times 5{,}5 \times \sqrt{2} = 76{,}3\ mm$

$n = \min(e\,; 1{,}25 \times m) = 32{,}5$

$\lambda = \frac{n}{m} = \frac{32{,}5}{76{,}3} = 0{,}43$

$\frac{2\,\lambda}{2\,\lambda + 1} = \frac{2 \times 0{,}43}{2 \times 0{,}43 + 1} = 0{,}46$

1ª e 6ª fiada (J.3.4.4 do EC 3)

Para 1ª e 6ª fiada, o comprimento característico l_{eff} é dado pelo menor dos seguintes valores:

Para o caso de fiadas extremas.

$l_{eff,d} = 0{,}5p + 2m + 0{,}625e$

$= 0{,}5 \times 100 + 2 \times 76{,}3 + 0{,}625 \times 32{,}5 = 222{,}9\ mm$

$l_{eff,d} = 4m + 1{,}25e = 4 \times 76{,}3 + 1{,}25 \times 32{,}5 = 345{,}8\ mm$

$l_{eff,d} = 2\pi m = 2 \times \pi \times 76{,}3 = 479{,}4\ mm$

Assim, $l_{eff,a} = 222{,}9\ mm$

O momento plástico é dado pela seguinte expressão,

$M_{pl\,,Rd} = \frac{t^2\ l_{eff}\ f_y}{4\,\gamma_{M0}} = \frac{18^2 \times 222{,}9 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1{,}1} = 3{,}86\ kN.m$

Determinação do modo de ruína (figura J.3.3 do EC 3)

$\beta = \frac{4\ M_{pl\,,Rd}}{m\ \sum F_{t,Rd}}$

Onde,

$\sum B_{t,Rd}$ – Somatório da resistência à tracção dos parafusos de uma fiada.

Então,

$\beta = \frac{4\ M_{pl\,,Rd}}{m\ \sum F_{t,Rd}} = \frac{4 \times 3{,}86 \times 10^3}{76{,}3 \times 2 \times 90{,}4} = 1{,}11 > \frac{2\lambda}{2\lambda + 1} = 0{,}46$

O modo de ruína é o Modo 2 (figura J.3.3 do EC 3). Ruptura dos parafusos, com cedência da placa.

$$F_{t,máx} = \frac{2\,M_{pl\,,Rd} + n\,\sum F_{t,Rd}}{m+n} =$$

$$= \frac{2\ \times 3{,}86 \times 10^3 + 32{,}5 \times 2 \times 90{,}4}{76{,}3 + 32{,}5} = 124{,}9\ kN$$

Desta forma verifica-se que, para a fiada 1 e 6 o esforço máximo suportado pela placa é de $F_{t,máx} = 124{,}9$, sendo que o esforço instalado máximo é de $F_{t,Sd} = 95{,}6\ kN$. Sendo assim a resistência esta assegurada.

2ª,3ª,4ª e 5ª fiada (J.3.4.4 do EC 3)

Para 2ª,3ª,4,e 5ª fiada, o comprimento característico l_{eff} é dado pelo menor dos seguintes valores:

Para o caso de fiadas interiores.

$l_{eff,c} = p = 100\ mm$

$l_{eff,c} = 4m + 1{,}25e = 4 \times 76{,}3 + 1{,}25 \times 32{,}5 = 345{,}8\ mm$

$l_{eff,c} = 2\pi m = 2 \times \pi \times 76{,}3 = 479{,}4\ mm$

Assim, $l_{eff,a} = 100\ mm$

O momento plástico é dado pela seguinte expressão,

$$M_{pl\,,Rd} = \frac{t^2\ l_{eff}\ f_y}{4\ \gamma_{M0}} = \frac{18^2 \times 100 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1{,}1} = 1{,}73\ kN.m$$

Determinação do modo de ruína (figura J.3.3 do EC 3)

$$\beta = \frac{4\ M_{pl\,,Rd}}{m\ \sum F_{t,Rd}}$$

Onde,

$\sum B_{t,Rd}$ – Somatório da resistência à tracção dos parafusos de uma fiada.

Então,

$$\beta = \frac{4\ M_{pl\,,Rd}}{m\ \sum F_{t,Rd}} = \frac{4 \times 1{,}73 \times 10^3}{76{,}3 \times 2 \times 90{,}4} = 0{,}50 > \frac{2\lambda}{2\lambda + 1} = 0{,}46$$

O modo de ruína é o Modo 2 (figura J.3.3 do EC 3). Ruptura dos parafusos, com cedência da placa.

$$F_{t,máx} = \frac{2\ M_{pl\ ,Rd} + n\ \sum F_{t,Rd}}{m+n} =$$

$$= \frac{2\ \times 1{,}73 \times 10^3 + 32{,}5 \times 2 \times 90{,}4}{76{,}3 + 32{,}5} = 85{,}8\ kN$$

Desta forma verifica-se que, para a fiada 2,3,4 e 5, o esforço máximo suportado pela placa é de $F_{t,máx} = 85{,}8\ kN$, sendo que o esforço instalado máximo é de $F_{t,Sd} = 78{,}3\ kN$. Sendo assim a resistência esta assegurada.

Resistência ao esmagamento (Quadro 6.5.3 do EC3)

A resistência ao esmagamento, é dada por:

$$F_{b,Rd} = \frac{2{,}5\ \alpha\ f_u d\ t}{\gamma_{Mb}}$$

Em que α, é o menor dos seguintes valores:

$$\frac{e_1}{3\ d_0} = \frac{32{,}5}{3 \times 18} = 0{,}6$$

$$\frac{p_1}{3\ d_0} - 0{,}25 = \frac{100}{3 \times 18} - 0{,}25 = 1{,}6$$

$$\frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800}{360} = 2{,}2$$

1

$t_{min} = 18\ mm$, espessura do banzo da viga resistente e da placa.

$$F_{b,Rd} = \frac{2{,}5 \times\ 0{,}6\ \times 360 \times\ 18 \times 18 \times 10^{-3}}{1{,}25} = 139{,}9\ kN > F_{v,Sd} = 12\ kN$$

Resistência ao esmagamento verificada.

Nota: Os 3 parafusos laterais de cada lado não foram considerados no dimensionamento. Estes apenas foram colocados devido a problemas de corrosão que podem ocorrer entre as chapas.

7.2. Ligação travessa (M3 e M4) – viga resistente

De acordo com o definido anteriormente, esta ligação foi idealizada como sendo rígida, e sendo assim terá de ser executada como tal. No entanto não será dimensionada com base no anexo J do EC3, pois a ligação não se assemelha a base de cálculo apresentada no anexo.

Para a ligação em análise, a posição mais crítica verifica - se para a posição $P1$, onde o momento instalado é maior.

Tabela 7.2 – Valores dos esforços actuantes (Posição $\boldsymbol{P1}$ do carro guincho)

	Pontos Críticos	N_{sd} $[kN]$	$V_{sd.x-y}$ $[kN]$	$V_{sd.x-z}$ $[kN]$	$V_{sd.y-z}$ $[kN]$	$M_{sd.x}$ $[kN.m]$	$M_{sd.y}$ $[kN.m]$	$M_{sd.z}$ $[kN.m]$
$\boldsymbol{M3}$	8	17,1 (C)	0,6	$-12,2$	-	0	$-19,7$	0,8

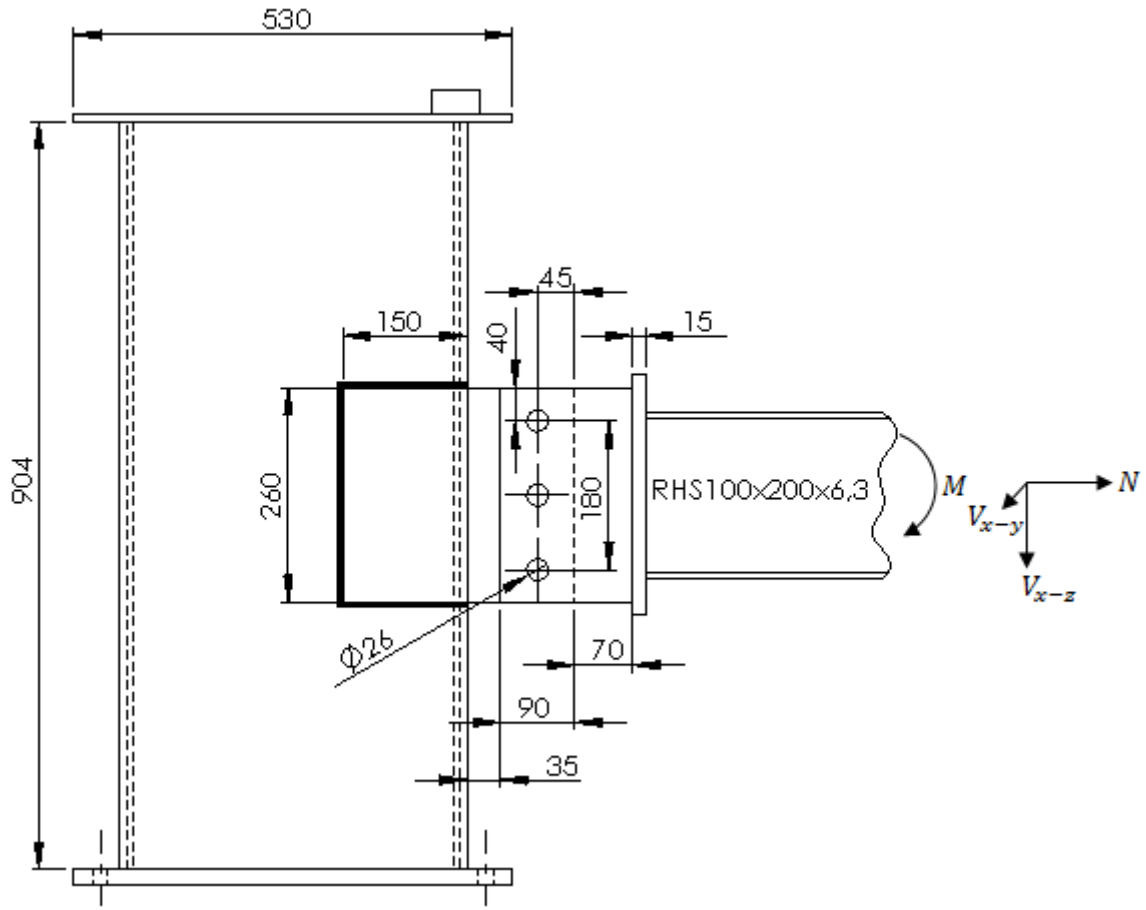


Figura 7.6 – Esquema da ligação/esforços instalados na ligação

Com base na figura 7.6, e tomando como centro de rotação o parafuso central, a força instalada nos dois parafusos devido ao momento é dada por:

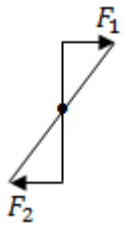


Figura 7.7 – Distribuição de forças

$$F_1 = F_2 = \frac{M_{sd,y}}{2\,h} = \frac{19{,}7 \times 10^3}{2 \times 90 \times 10^{-3}} = 109{,}4\ kN$$

Com base na figura 7.6, o esforço de corte nos parafusos, é dado pela resultante da força, devido ao momento e ao esforço normal, com o esforço transverso no plano vertical x-z. Então o esforço de corte por parafuso é dado por,

$$V_{sd} = \sqrt{\left(F_1 + \frac{N_{sd}}{3}\right)^2 + \left(\frac{V_{sd,x-z}}{3}\right)^2} = \sqrt{\left(109{,}4 + \frac{17{,}1}{3}\right)^2 + \left(\frac{12{,}2}{3}\right)^2} = 115{,}2\ kN$$

Existem também, esforços transversos no plano horizontal x-y, e momento segundo o eixo dos zz, gerando assim tracção nos parafusos. Estas forças são dadas então por,

$$F_{sd} = \frac{V_{sd.x-y}}{3} + \frac{M_{sd.z}}{3 \times x} = \frac{0{,}6}{3} + \frac{0{,}8 \times 10^3}{3 \times 45 \times 10^{-3}} = 5{,}9\ kN$$

Dimensionamento da chapa de amarração

Como a chapa esta à compressão, e é de dimensões reduzidas.

$$N_{Sd} = 126{,}5\ kN < N_{Rd} = \frac{A\,f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{15 \times 260 \times 235 \times 10^{-3}}{1{,}1} = 833{,}2\ kN$$

Resistência verificada.

Nota: O valor do N_{sd}, foi considerado como sendo igual ao esforço normal de compressão instalado, mais, a força gerada pelo momento instalado.

Dimensionamento dos parafusos

Foram escolhidos parafusos M 24, classe 8.8 Com uma tensão de ruptura $f_{ub} = 800\,MPa$, diâmetro dos furos $d_0 = 26\,mm$, diâmetro nominal $d = 24\,mm$, secção resistente a tracção $A_s = 353\,mm^2$.

Resistência ao corte (Quadro 6.5.3 do EC 3)

$$F_{v,Rd} = \frac{0{,}6\,f_{ub}\,A_s}{\gamma_{Mb}} = \frac{0{,}6 \times 800 \times 353 \times 10^{-3}}{1{,}25} = 135{,}6\,kN$$

$$F_{v,Rd} > V_{sd} = 115{,}2\,kN$$

Resistência verificada

Resistência á tracção (Quadro 6.5.3 do EC 3)

$$F_{t,Rd} = \frac{0{,}9\,f_{ub}\,A_s}{\gamma_{Mb}} = \frac{0{,}9 \times 800 \times 353 \times 10^{-3}}{1{,}25} = 203{,}3\,kN$$

$$F_{t,Rd} >> F_{sd} = 1{,}9\,kN$$

Resistência verificada.

Nota: Apesar de existirem, para outras posições do carro-guincho, esforços transversos no plano horizontal $V_{sd.x-y}$, e momentos $M_{sd,z}$ ligeiramente superiores ao verificados para a posição $P1$ do carro, não se justifica fazer a verificação, pois a resistência a tracção dos parafusos é muito elevada, e os restantes esforços instalados para essa posição são inferiores.

Resistência dos parafusos a esforços combinados (6.5.5 do EC 3)

Parafusos que estejam simultaneamente sujeitos ao corte e à tracção devem, satisfazer a seguinte condição:

$$\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Sd}}{1{,}4F_{t,Rd}} \leq 1{,}0$$

$$\frac{115{,}2}{135{,}6} + \frac{5{,}9}{1{,}4 \times 203{,}3} = 0{,}88 \leq 1{,}0$$

Resistência verificada.

Resistência ao esmagamento (Quadro 6.5.3 do EC3)

A resistência ao esmagamento, é dada por:

$$F_{b,Rd} = \frac{2{,}5\ \alpha\ f_u d\ t}{\gamma_{Mb}}$$

Em que α, é o menor dos seguintes valores:

$$\frac{e_1}{3\ d_0} = \frac{45}{3 \times 26} = 0{,}58$$

$$\frac{p_1}{3\ d_0} - 0{,}25 = \frac{80}{3 \times 26} - 0{,}25 = 0{,}78$$

$$\frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800}{360} = 2{,}2$$

1

$$t_{min} = 15\ mm$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2{,}5 \times\ 0{,}58\ \times 360 \times\ 15 \times 24 \times 10^{-3}}{1{,}25} = 150\ kN > F_{v,Sd} = 115{,}2\ kN$$

Resistência ao esmagamento verificada.

7.3. Ligação diagonal (D6 e D8) - pilar

Estas diagonais de acordo com o esquema estático definido estarão a compressão $N_{sd} = 127{,}9\ kN\ (C)$, no entanto e como já foi referido anteriormente quando as solicitações horizontais trocam de direcção, estas diagonais ficam a tracção $N_{sd} = 119{,}2\ kN$.

A geometria das chapas para ligações articuladas em forma de olhal, para uma dada espessura $t = 15\ mm$, é dada por:

$$a \geq \frac{N_{sd}\,\gamma_{Mp}}{2\,t\,f_y} + \frac{2\,d_0}{3} = \frac{127{,}9 \times 235 \times 10^3 \times\ 1{,}25}{2 \times\ 15\ \times 235} + \frac{2\ \times 26}{3} = 40{,}1\ mm$$

$$c \geq \frac{N_{sd}\,\gamma_{Mp}}{2\,t\,f_y} + \frac{d_0}{3} = \frac{127{,}9 \times 10^3 \times 1{,}25}{2 \times\ 15\ \times 235} + \frac{26}{3} = 31{,}4\ mm$$

De acordo com as dimensões mínimas para a e c (ver figura abaixo), estabeleceu-se a seguinte geometria para a ligação.

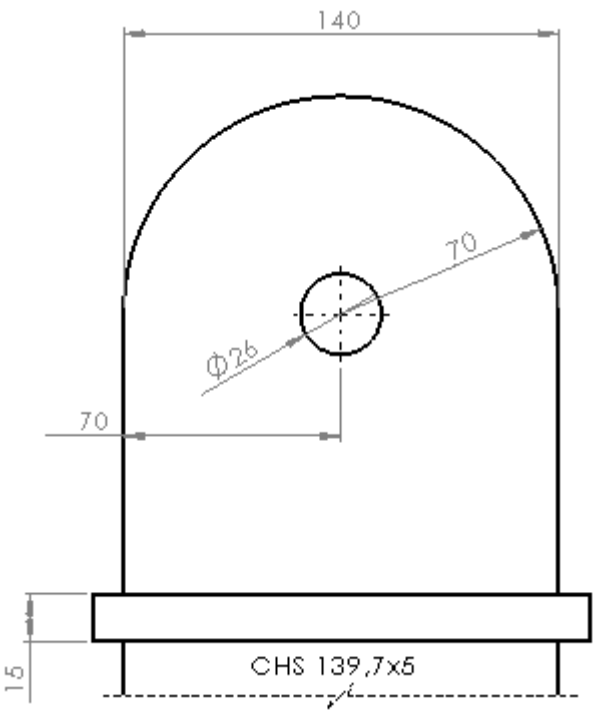


Figura 7.8 – Geometria da ligação do elemento

Foram escolhidos parafusos M 24, classe 8.8. Com uma tensão de ruptura $f_{ub} = 800\ MPa$, diâmetro dos furos $d_0 = 26\ mm$, diâmetro nominal $d = 24\ mm$, secção resistente a tracção $A_s = 353\ mm^2$.

Resistência ao corte (Quadro 6.5.3 do EC 3)

O esforço de corte no parafuso, é dado por:

$F_{v,Sd} = N_{Sd,máx} = 127{,}9\ kN$

$$F_{v,Rd} = \frac{0{,}6\ f_{ub}\ A_s}{\gamma_{Mb}} = \frac{0{,}6 \times 800 \times 353 \times 10^{-3}}{1{,}25} = 135{,}6\ kN > F_{v,Sd}$$

$F_{v,Rd} > F_{v,Sd} = 127{,}9\ kN$

Resistência ao corte verificada.

Resistência ao Esmagamento (Quadro 6.5.3 e pontos 6.5.11,6.5.13 do EC 3)

A resistência ao esmagamento vem:

$$F_{b,Rd} = \frac{2{,}5\ \alpha\ f_u\ d\ t_{min}}{\gamma_{M2}}$$

Onde, $t_{min} = 10\ mm$ (espessura da chapa de ligação ao gousset)

α, é o menor dos seguintes valores:

$$\frac{e_1}{3\ d_0} = \frac{70}{3 \times 26} = 0{,}89$$

$$\frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800}{360} = 2{,}2$$

1

$$F_{b,Rd} = \frac{2{,}5 \times\ 0{,}89\ \times 360 \times\ 24 \times\ 15 \times 10^{-3}}{1{,}25} = 230{,}7\ kN > F_{v,Sd}$$

Em ligações por sobreposição simples de chapas, com apenas um parafuso, o parafuso deve ser munido de anilhas colocadas sob a cabeça e sob a porca de modo a evitar a rotura por arrancamento.

O valor de calculo da resistência ao esmagamento $F_{b,Rd}$, será então limitado por,

$$F_{b,Rd} = \frac{1{,}5\ f_u\ d\ t_{min}}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = \frac{1{,}5 \times 360 \times 24 \times 15 \times 10^{-3}}{1{,}25} = 155{,}5\ kN$$

$$F_{v,Rd} > F_{v,Sd} = 129{,}1\ kN$$

Resistência ao esmagamento verificada.

As travessas D5 e D7 ficam também dimensionadas pois os esforços, instalados são inferiores aos das diagonais, e a secção tubular é a mesma.

7.4. Ligação pilar – carro lateral

Para a ligação em análise, a posição mais crítica verifica - se para a posição $P13$, onde o momento instalado é maior.

Tabela 7.3 – Valores dos esforços actuantes (Posição $\boldsymbol{P13}$ do carro guincho)

	Pontos Críticos	N_{sd} $[kN]$	$V_{sd.x-y}$ $[kN]$	$V_{sd.x-z}$ $[kN]$	$V_{sd.y-z}$ $[kN]$	$M_{sd.x}$ $[kN.m]$	$M_{sd.y}$ $[kN.m]$	$M_{sd.z}$ $[kN.m]$
$\boldsymbol{P11}$	18	253,4 (C)	-	$-5,6$	6,2	0	$-44,7$	0,4
$\boldsymbol{C14}$	18	43,3 (C)	$-6,2$	$-340,1$	-	0	$-203,8$	$-3,8$

De acordo com os esforços da tabela acima e tendo em conta o referencial usado tem-se,

$$V_1 = V_{sd,x-y}(C13) = 6,2\ kN$$
$$V_2 = N_{sd}(C13) = 43,3\ kN$$
$$V_{resultante} = \sqrt{V^2{}_1 + V^2{}_2} = 43,7\ kN$$
$$M_1 = M_{sd,y}(P11) = 44,7\ kN.m$$

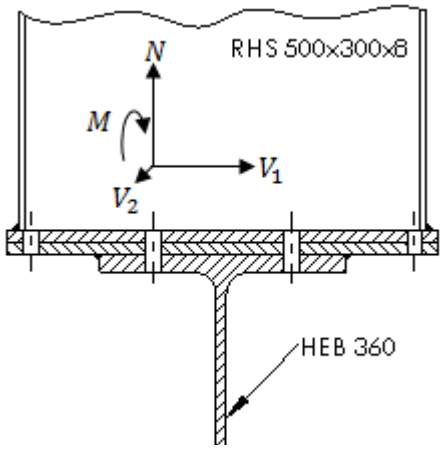


Figura 7.9 – Esforços no parafuso (corte B-B)

Considerando-se como eixo de rotação o ponto assinalado na figura 7.9, a distribuição dos esforços de tracção nas diferentes fiadas de parafusos (figura 7.9), é a seguinte.

$$M_{Sd} = F_1 \times x_1 + F_2 \times x_2$$
$$= \frac{F_i}{x_i} \times (x_1^2 + x_2^2)$$
$$44,7 \times 10^3 = \frac{F_i}{h_i} \times (30^2 + 390^2)$$

Tendo em conta figura abaixo temos,

$$F_1 = 114,0\ kN$$
$$F_2 = 8,8\ kN$$

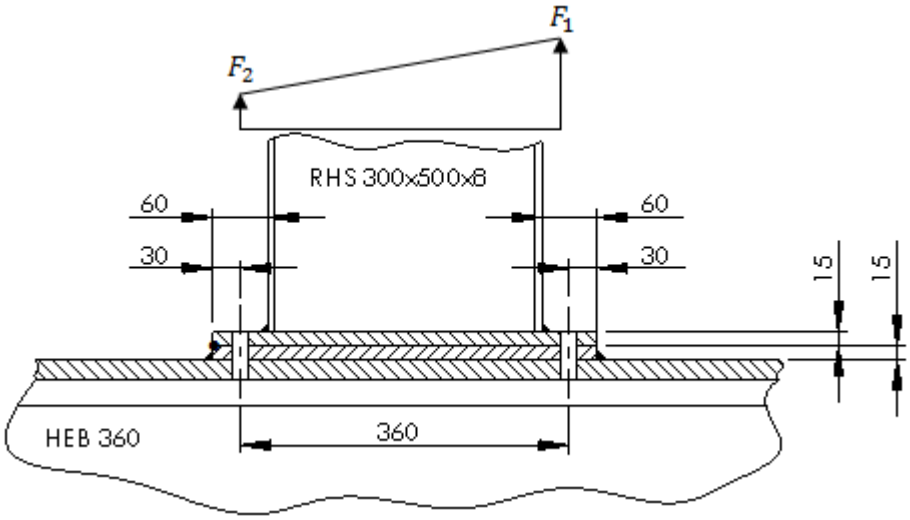


Figura 7.10 – Distribuição de forças do nó rígido (corte A-A)

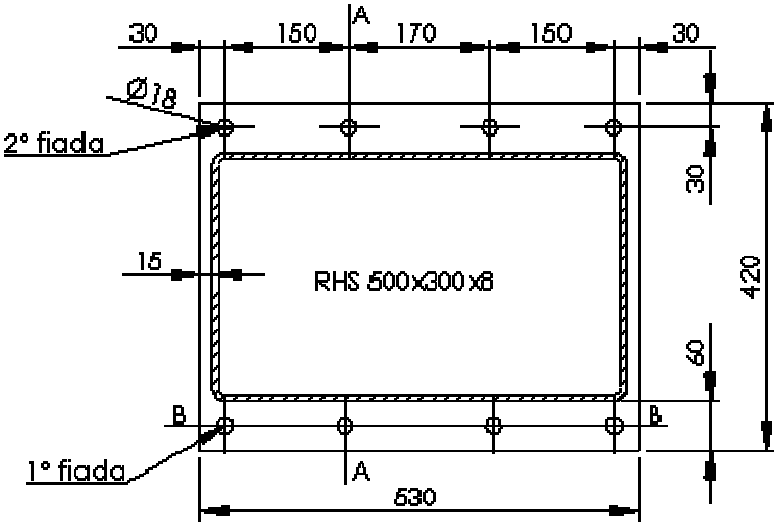


Figura 7.11 – Geometria da ligação/identificação das fiadas

Dimensionamento dos parafusos

Foram escolhidos parafusos M 16, classe 8.8. Com uma tensão de ruptura $f_{ub} = 800\ MPa$, diâmetro dos furos $d_0 = 18\ mm$, diâmetro nominal $d = 16mm$, secção resistente a tracção $A_s = 157\ mm^2$.

Considerem-se 8 parafusos da classe 8.8 distribuídos pelas 2 fiadas.

Resistência á tracção (Quadro 6.5.3 do EC 3)

$$F_{t,Rd} = \frac{0{,}9\ f_{ub}\ A_s}{\gamma_{Mb}} = \frac{0{,}9 \times 800 \times 157 \times 10^{-3}}{1{,}25} = 90{,}4\ kN$$

$$F_{t,Rd} > \frac{F_1}{4} = \frac{114{,}0}{4} = 28{,}5\ kN$$

Resistência verificada.

Nota: Divide-se por 4, pois cada fiada tem 4 parafusos e como tal a força instalada F_1 é dividida pelos 4 parafusos.

Resistência ao corte (Quadro 6.5.3 do EC 3)

Admitindo que só dois parafusos trabalham ao corte,

$$F_{v,Rd} = \frac{0{,}6\, f_{ub}\, A_s}{\gamma_{Mb}} = \frac{0{,}9 \times 800 \times 157 \times 10^{-3}}{1{,}25} = 60{,}3\ kN$$

$$F_{v,Rd} > \frac{V_{Sd}}{2} = \frac{43{,}7}{2} = 21{,}9\ kN$$

Resistência verificada.

Resistência dos parafusos a esforços combinados (6.5.5 do EC 3)

Parafusos que estejam simultaneamente sujeitos ao corte e à tracção devem, satisfazer a seguinte condição:

$$\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Sd}}{1{,}4 F_{t,Rd}} \leq 1{,}0$$

$$\frac{21{,}9}{60{,}3} + \frac{28{,}5}{1{,}4 \times 90{,}4} = 0{,}59 \leq 1{,}0$$

Resistência verificada.

Resistência do banzo do carro lateral

Para a verificação da resistência do banzo, apenas se vão considerar os dois parafusos interiores, que apertam ao banzo.

De acordo com à disposição dos furos para os parafusos, estabeleceram-se as seguintes considerações geométricas:

$$e = 65\ mm$$

$$m = d - 0{,}8\, r = 78{,}75 - 0{,}8 \times 27 = 57{,}2\ mm$$

$$n = \min(e\,; 1{,}25 \times m) = 65$$

$$\lambda = \frac{n}{m} = \frac{65}{57{,}15} = 1{,}14$$

$$\frac{2\,\lambda}{2\,\lambda + 1} = \frac{2 \times 1{,}14}{2 \times 1{,}14 + 1} = 0{,}70$$

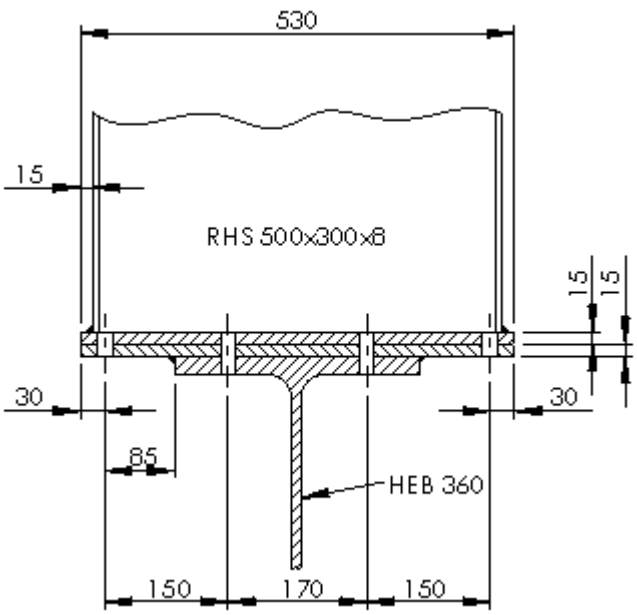


Figura 7.12 – Corte B-B

1ª e 2ª fiada (J.3.4.1 do EC 3)

Para 1ª e 2ª fiada, o comprimento característico l_{eff} é dado pelo menor dos seguintes valores:

Para o caso de fiadas extremas.

$l_{eff,b} = 0{,}5p + 2m + 0{,}625e$

$= 0{,}5 \times 360 + 2 \times 57{,}2 + 0{,}625 \times 65 = 335{,}1\ mm$

$l_{eff,b} = 4m + 1{,}25e = 4 \times 57{,}2 + 1{,}25 \times 65 = 310{,}1\ mm$

$l_{eff,b} = 2\pi m = 2 \times \pi \times 57{,}2 = 359{,}4\ mm$

Assim, $l_{eff,b} = 310{,}1\ mm$

O momento plástico é dado pela seguinte expressão,

$$M_{pl,Rd} = \frac{t^2\ l_{eff}\ f_y}{4\ \gamma_{M0}} = \frac{15^2 \times 310{,}1 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1{,}1} = 3{,}73\ kN.m$$

Determinação do modo de ruína (figura J.3.3 do EC 3)

$$\beta = \frac{4\ M_{pl,Rd}}{m\ \sum F_{t,Rd}}$$

Onde,

$\sum B_{t,Rd}$ – Somatório da resistência à tracção dos parafusos de uma fiada.

Então,

$$\beta = \frac{4\,M_{pl\,,Rd}}{m\,\sum F_{t,Rd}} = \frac{4 \times 3{,}73 \times 10^3}{57{,}2 \times 2 \times 90{,}4} = 1{,}44 > \frac{2\lambda}{2\lambda + 1} = 0{,}70$$

O modo de ruína é o Modo 2 (figura J.3.3 do EC 3). Ruptura dos parafusos, com cedência da placa testa.

$$F_{t,máx} = \frac{2\,M_{pl\,,Rd} + n\,\sum F_{t,Rd}}{m + n} =$$

$$= \frac{2\ \times 3{,}73 \times 10^3 + 65 \times 2 \times 90{,}4}{57{,}2 + 65} = 157{,}2\ kN$$

Desta forma verifica-se que, para a fiada 1 e 2 o esforço máximo suportado pelo banzo do carro lateral é de $F_{t,máx} = 157{,}2$, sendo que o esforço instalado máximo é de $F_{t,Sd} = 114{,}0\ kN$. Sendo assim a resistência esta assegurada.

Resistência da placa

Para a verificação da resistência da testa, apenas se vão considerar os dois parafusos exteriores de cada fila.

Admitamos uma placa testa com, $530 \times 620 \times 15$, soldada ao pilar por meio de um cordão continuo com $a = 5{,}5\ mm$ de garganta.

$e_x\ = 30\ mm$

$m_x = d - 0{,}8\ a\ \sqrt{2} = 30 - 0{,}8 \times\ 5{,}5 \times\ \sqrt{2} = 23{,}8\ mm$

$e\ \ = 30\ mm$

$m\ = 15\ mm$

$n = \min(e\ ; 1{,}25 \times m) = 18{,}8$

$$\lambda = \frac{n}{m} = \frac{18{,}8}{15} = 1{,}25$$

$$\frac{2\,\lambda}{2\,\lambda + 1} = \frac{2 \times 1{,}25}{2 \times 1{,}25 + 1} = 0{,}71$$

1ª e 2ª fiada (J.3.4.4 do EC 3)

Para 1ª e 2ª fiada, o comprimento característico l_{eff} é dado pelo menor dos seguintes valores:

Para o caso de fiadas de fora

$l_{eff,a} = 0{,}5b_p = 0{,}5 \times 530 = 265mm$

$l_{eff,a} = 0{,}5w + 2m_x + 0{,}625e_x =$

$= 0{,}5 \times 470 + 2 \times 23{,}8 + 0{,}625 \times 30 = 301{,}4\ mm$

$l_{eff,a} = 4m_x + 1{,}25e_x = 4 \times 23{,}8 + 1{,}25 \times 30 = 132{,}7\ mm$

$l_{eff,a} = 2\pi m_x = 2 \times \pi \times 20{,}9 = 149{,}5\ mm$

Assim, $l_{eff,a} = 132{,}7\ mm$

O momento plástico é dado pela seguinte expressão,

$$M_{pl,Rd} = \frac{t^2\ l_{eff}\ f_y}{4\ \gamma_{M0}} = \frac{15^2 \times 132{,}7 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1{,}1} = 1{,}59\ kN.m$$

Determinação do modo de ruína (figura J.3.3 do EC 3)

$$\beta = \frac{4\ M_{pl,Rd}}{m\ \sum F_{t,Rd}}$$

Onde,

$\sum B_{t,Rd}$ – Somatório da resistência à tracção dos parafusos de uma fiada.

Então,

$$\beta = \frac{4\ M_{pl,Rd}}{m\ \sum F_{t,Rd}} = \frac{4 \times 1{,}59 \times 10^3}{15 \times 2 \times 90{,}4} = 2{,}34 > 2$$

O modo de ruína é o Modo 3 (figura J.3.3 do EC 3). Ruptura dos parafusos.

$$F_{t,máx} = \sum F_{t,Rd} = 2 \times 90{,}4 = 180{,}8\ kN$$

Desta forma verifica-se que, para a fiada 1 e 6 o esforço máximo suportado pela placa é de $F_{t,máx} = 180{,}8$, sendo que o esforço instalado máximo é de $F_{t,Sd} = 114{,}0\ kN$. Sendo assim a resistência esta assegurada.

Resistência ao esmagamento (Quadro 6.5.3 do EC3)

A resistência ao esmagamento, é dada por:

$$F_{b,Rd} = \frac{2{,}5\ \alpha\ f_u d\ t}{\gamma_{Mb}}$$

Em que α, é o menor dos seguintes valores:

$$\frac{e_1}{3\,d_0} = \frac{30}{3 \times 18} = 0{,}56$$

$$\frac{p_1}{3\,d_0} - 0{,}25 = \frac{150}{3 \times 18} - 0{,}25 = 2{,}53$$

$$\frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800}{360} = 2{,}2$$

1

$t_{min} = 15\ mm$, espessura da chapa de testa.

$$F_{b,Rd} = \frac{2{,}5 \times\ 0{,}56\ \times 360 \times\ 18 \times 15 \times 10^{-3}}{1{,}25} = 108{,}7\ kN > F_{v,Sd} = 21{,}9\ kN$$

Resistência ao esmagamento verificada.

7.5. Ligação carro lateral bloco de rodas

De acordo com o catálogo da STAHL, e para blocos de rodas do tipo **SR-E 400,** a ligação ao carro é efectuada por meio de 8 parafusos M20 classe 8.8, apertados ao banzo carro (HEB360).

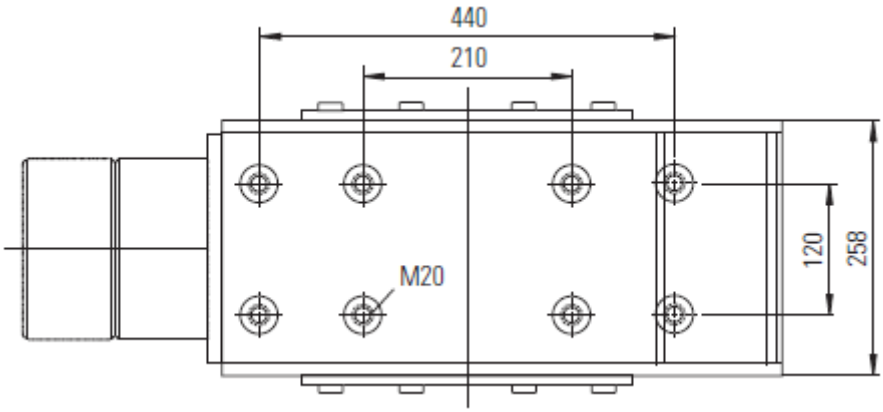


Figura 7.13 – Blocos de rodas /Posição dos parafusos

8. Dimensionamento dos Cordões de Soldadura

O dimensionamento dos cordões de soldadura foi efectuado, de acordo com o REAPE (4), Capítulo IV, artigo 60º. No entanto e de acordo com o Capítulo III, artigo 29º, as dimensões dos cordões de soldadura devem satisfazer aos seguintes condicionamentos:

a) A espessura dos cordões não deve ser inferior a $3\ mm$;
b) A espessura dos cordões de ângulo não deve ser superior a $0{,}7\ mm$ da menor espessura dos elementos a ligar;
c) Os cordões de ângulo contínuos não devem ter comprimento inferior a $40\ mm$;

8.1. Ligação viga resistente – pilar

O dimensionamento do cordão de soldadura que liga o tubo a chapa de testa segue o artigo 60º do REAPE, figura 25 h).

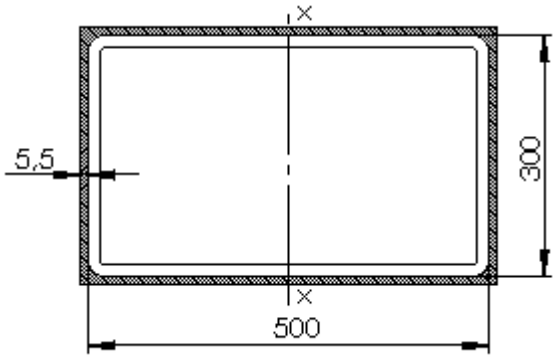


Figura 8.1 – Pormenor dos cordões de soldadura

Tabela 8.1 – Valores dos esforços actuantes (Posição ***P7*** do carro guincho)

	Pontos Críticos	N_{sd} $[kN]$	$V_{sd.x-y}$ $[kN]$	$V_{sd.x-z}$ $[kN]$	$V_{sd.y-z}$ $[kN]$	$M_{sd.x}$ $[kN.m]$	$M_{sd.y}$ $[kN.m]$	$M_{sd.z}$ $[kN.m]$
$\boldsymbol{V1}$	13	$11{,}5\ (C)$	10,6	-	$-134{,}6$	124,3	22,9	$-8{,}6$
$\boldsymbol{P11}$	13	$142{,}7\ (C)$	-	$-19{,}6$	13,8	$-124{,}3$	32,7	5,5

De acordo com os esforços da tabela acima e tendo em conta o referencial usado tem-se,

$N = N_{sd}(P11) = 142{,}7\ kN$

$V_1 = V_{sd,y-z}(P11) = 13{,}8\ kN$

$V_2 = V_{sd,x-z}(P11) = 19{,}6\ kN$

$M = M_{sd,x}(V1) = M_{sd,x}(P11) = 124{,}3\ kN.m$

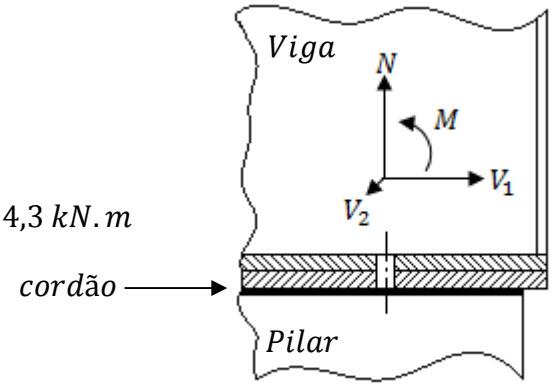


Figura 8.2 – Esforços no cordão de soldadura

A espessura mínima na ligação é a espessura do tubo com $t_{tubo} = 8\ mm$, pois a chapa tem uma espessura de $t_{chapa} = 18\ mm$. Então, pode-se escrever o seguinte:

$$3 \leq a \leq 0{,}7 \times t_{tubo} = 5{,}6 \Rightarrow a = 5{,}5\ mm$$

Para os cordões verticais, desprezam-se os esforços transversos na direcçãoV_1, ou seja o esforço transverso perpendicular aos cordões verticais.

$$\sigma_{sd,ref} = \frac{1}{0{,}77}\left(\frac{N_{sd}}{\sum l \times a} \pm \frac{M_{sd,x}}{h\ l\ a}\right)$$

Onde,

$$\sum l \times a = 2(300 \times 5{,}5 + 500 \times 5{,}5) = 8800\ mm^2$$

Então,

$$\sigma_{sd,ref} = \frac{1}{0{,}77}\left(\frac{142{,}7 \times 10^3}{8800} \pm \frac{124{,}3 \times 10^6}{500 \times 300 \times 5{,}5}\right) = 216{,}7\ < f_y = 235\ Mpa$$

Condição verificada.

Para os cordões horizontais, despreza-se o momento flector.

$$\sigma_{sd,ref} = \frac{1}{0{,}90}\sqrt{1{,}4\left(\frac{N_{sd}}{\sum l \times a}\right)^2 + 1{,}8\left(\frac{V_1}{\sum l_{horizontal}\ a}\right)}$$

$$= \frac{1}{0{,}90}\sqrt{1{,}4\left(\frac{142{,}7 \times 10^3}{8800}\right)^2 + 1{,}8\left(\frac{13{,}8 \times 10^3}{2 \times 500 \times 5{,}5}\right)^2} = 21{,}6\ < f_y = 235\ Mpa$$

Condição verificada.

Os restantes esforços não são considerados, pois são muito pequenos, e sua contribuição é insignificante.

8.2. Ligação travessa (M3 e M4) – viga resistente

O dimensionamento do cordão de soldadura que liga a chapa Gousset a viga resistente segue o artigo 60º do REAPE.

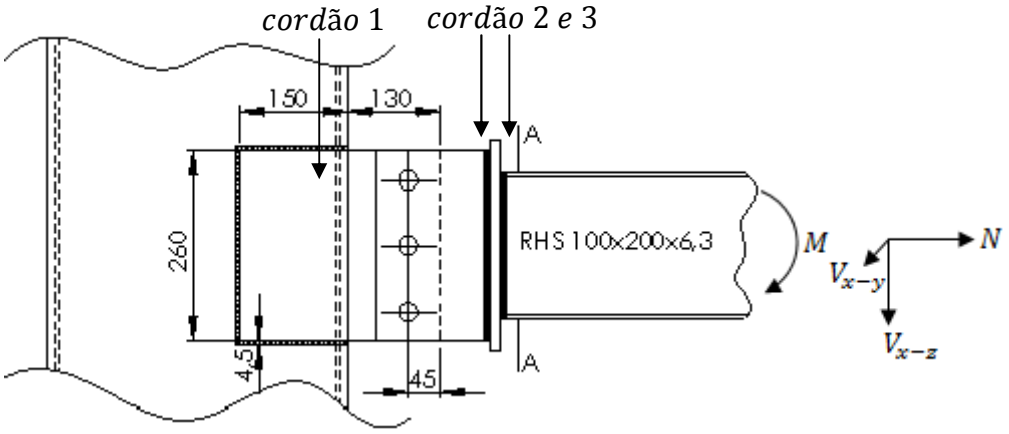


Figura 8.3 – Pormenor dos cordões de soldadura/esforços instalados na ligação

Tabela 8.2 – Valores dos esforços actuantes na ligação (Posição $\boldsymbol{P1}$ do carro guincho)

	Pontos Críticos	N_{sd} $[kN]$	$V_{sd.x-y}$ $[kN]$	$V_{sd.x-z}$ $[kN]$	$V_{sd.y-z}$ $[kN]$	$M_{sd.x}$ $[kN.m]$	$M_{sd.y}$ $[kN.m]$	$M_{sd.z}$ $[kN.m]$
$\boldsymbol{M3}$	8	17,1 (C)	0,6	$-12,2$	-	0	$-19,7$	0,8

Cordão 1

Uma vez que a espessura mínima das chapas a ligar é a chapa de testa da viga resistente com $t_{testa} = 10\ mm$, pois o gousset tem uma espessura de $t_{gousset} = 15\ mm$. Então, pode-se escrever o seguinte:

$$3 \leq a \leq 0{,}7 \times t_{testa} = 7 \Rightarrow a = 7\ mm$$

Considerando o artigo 60º, figura 25, caso b), e considerando apenas os cordões horizontais, tem-se,

$$\sigma_{sd,ref} = \frac{F_{sd}}{0{,}67 \sum l \times a}$$

Onde, F_{sd} é a carga paralela aos cordões de soldadura horizontais, e é dada por:

$$F_{sd} = N_{sd} + F_1 = 17{,}1 + 109{,}4 = 126{,}5\ kN$$

Nota: F_1 é força devida ao momento M_y aplicado, já calculada aquando do dimensionamento dos parafusos.

Então,

$$\sigma_{sd,ref} = \frac{126{,}5 \times 10^3}{0{,}67 \times 2 \times 150 \times 7} = 89{,}9\ Mpa < f_y = 235\ Mpa$$

Condição verificada.

Para o esforço transverso no plano x-z, considera-se a situação a) do artigo 60º, onde a carga actua perpendicularmente ao cordão de soldadura.

$$\sigma_{sd,ref} = \frac{F_{sd}}{0{,}77 \sum l \times a}$$

Onde, F_{sd} é a carga perpendicular aos cordões de soldadura, que é dada por:

$$F_{sd} = V_{sd.x-z} = 12{,}2\ kN$$

Então,

$$\sigma_{sd,ref} = \frac{12{,}2 \times 10^3}{0{,}77 \times 2 \times 260 \times 7} = 4{,}4\ Mpa < f_y = 235\ Mpa$$

Condição verificada.

Os restantes esforços não são considerados, pois são muito pequenos, e sua contribuição é insignificante.

Cordão 2

A espessura mínima na ligação é a espessura da chapa com $t_{chapa} = 15\ mm$ (os elementos a ligar têm a mesma espessura). Então, pode-se escrever o seguinte:

$$3 \leq a \leq 0{,}7 \times t_{chapa} = 10{,}5 \Rightarrow a = 7\ mm$$

Considerando o artigo 60º, figura 25, caso f), tem-se,

$$\sigma_{sd,ref} = \frac{F_{sd}}{0{,}77 \sum l \times a}$$

Onde, F_{sd} é a carga transversal aos cordões de soldadura, e é dada por:

$$F_{sd} = N_{sd} + F_1 = 17{,}1 + 109{,}4 = 126{,}5\ kN$$

Nota: F_1 é força devida ao momento M_y aplicado, já calculada aquando do dimensionamento dos parafusos.

Então,

$$\sigma_{sd,ref} = \frac{126{,}5 \times 10^3}{0{,}77 \times 2 \times 260 \times 6} = 52{,}7\ Mpa < f_y = 235\ Mpa$$

Condição verificada.

Para o esforço transverso no plano x-z, considera-se a situação b) do artigo 60º, onde a carga actua paralelamente ao cordão de soldadura.

$$\sigma_{sd,ref} = \frac{F_{sd}}{0{,}67 \sum l \times a}$$

Onde, F_{sd} é a carga paralela aos cordões de soldadura, que é dada por:

$$F_{sd} = V_{sd.x-z} = 12{,}2\ kN$$

Então,

$$\sigma_{sd,ref} = \frac{12{,}2 \times 10^3}{0{,}67 \times 2 \times 260 \times 7} = 5\ Mpa < f_y = 235\ Mpa$$

Condição verificada.

Os restantes esforços não são considerados, pois são muito pequenos, e sua contribuição é insignificante.

Cordão 3

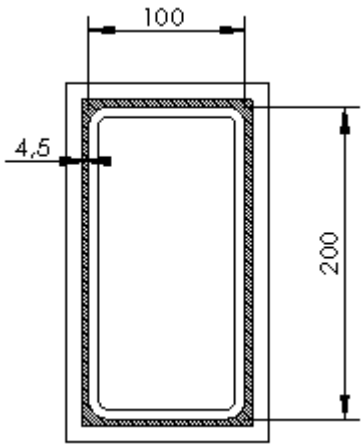


Figura 8.4 – Corte A-A

A espessura mínima na ligação é a espessura do tubo com $t_{tubo} = 6{,}3\ mm$, pois a chapa tem uma espessura de $t_{chapa} = 15\ mm$. Então, pode-se escrever o seguinte:

$$3 \leq a \leq 0{,}7 \times t_{tubo} = 4{,}41 \Rightarrow a = 4{,}5\ mm$$

Para os cordões horizontais, desprezam-se os esforços transversos do plano x-z, ou seja o esforço transverso perpendicular aos cordões horizontais. Considerando o artigo 60º, figura 25, caso h), tem-se,

$$\sigma_{sd,ref} = \frac{1}{0{,}77}\left(\frac{N_{sd}}{\sum l \times a} \pm \frac{M_{sd,y}}{h\ l\ a}\right)$$

Onde,

$$\sum l \times a = 2(200 \times 4{,}5 + 100 \times 4{,}5) = 2700\ mm^2$$

Então,

$$\sigma_{sd,ref} = \frac{1}{0{,}77}\left(\frac{17{,}1 \times 10^3}{2700} \pm \frac{19{,}7 \times 10^6}{200 \times 100 \times 4{,}5}\right) = 225{,}2\ < f_y = 235\ Mpa$$

Condição verificada.

Para os cordões verticais, despreza-se o momento flector.

$$\sigma_{sd,ref} = \frac{1}{0{,}90}\sqrt{1{,}4\left(\frac{N_{sd}}{\sum l \times a}\right)^2 + 1{,}8\left(\frac{V_{sd.x-z}}{\sum l_{vertical}\ a}\right)}$$

$$= \frac{1}{0{,}90}\sqrt{1{,}4\left(\frac{17{,}1 \times 10^3}{2700}\right)^2 + 1{,}8\left(\frac{12{,}2 \times 10^3}{2 \times 200 \times 4{,}5}\right)^2} = 13{,}1\ < f_y = 235\ Mpa$$

Condição verificada.

Os restantes esforços não são considerados, pois são muito pequenos, e sua contribuição é insignificante.

8.3. Ligação diagonal (D6 e D8) - pilar

O dimensionamento do cordão de soldadura que liga o tubo a patela, segue então o artigo 60º do REAPE, figura 20 f).

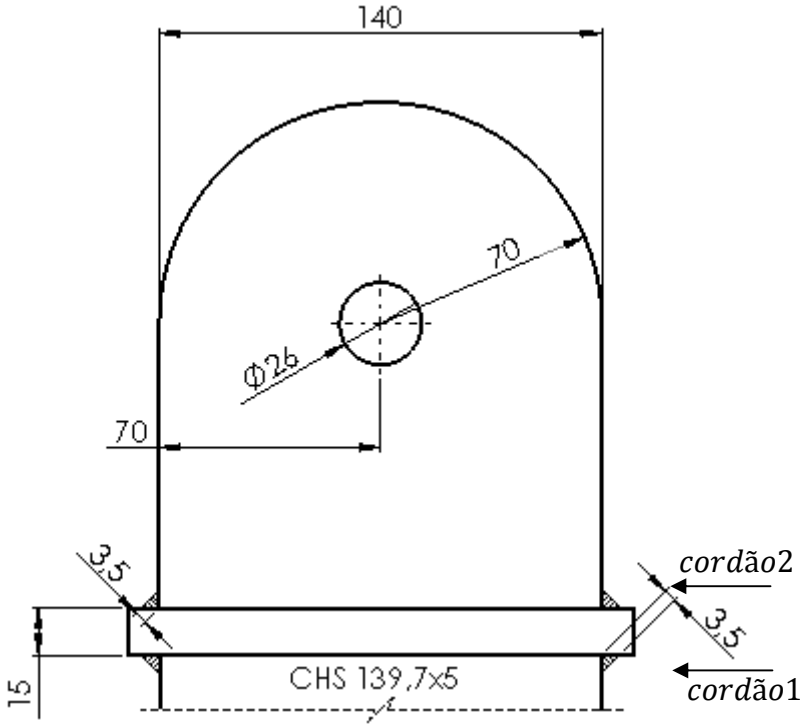


Figura 8.5 – Pormenor dos cordões de soldadura

Cordão 1

A espessura mínima na ligação é a espessura do tubo, com $t_{tubo} = 5\ mm$, pois a chapa tem uma espessura de $t_{chapa} = 15\ mm$. Então, pode-se escrever o seguinte:

$$3 \leq a \leq 0{,}7 \times t_{tubo} = 3{,}5 \Rightarrow a = 3{,}5\ mm$$

Este montante apenas é solicitado segundo o seu eixo, com $N_{sd} = 127{,}9\ kN$. Então e de acordo com REAPE, temos

$$\sigma_{sd,ref} = \frac{F_{sd}}{0{,}77 \sum l \times a}$$

Onde,

$$\sum l \times a = 2 \times \pi \times 69{,}9 \times 3{,}5 = 1536{,}1\ mm^2$$

Então,

$$\sigma_{sd,ref} = \frac{127{,}9 \times 10^3}{0{,}77 \times 1536{,}1} = 108{,}1 < f_y = 235\ Mpa$$

Condição verificada.

Cordão 2

$$\sigma_{sd,ref} = \frac{F_{sd}}{0{,}77 \sum l \times a}$$

Onde,

$$\sum l \times a = 2 \times 140 \times 3{,}5 = 980\ mm^2$$

Então,

$$\sigma_{sd,ref} = \frac{127{,}9 \times 10^3}{0{,}77 \times 3980} = 169{,}5 < f_y = 235\ Mpa$$

Condição verificada.

As ligações das travessas D5 e D7 ficam também, dimensionadas quanto aos cordões de soldadura, pois os esforços instalados são inferiores e as dimensões da ligação são as mesmas.

8.4. Ligação pilar – carro lateral

Cordão 1

O dimensionamento do cordão de soldadura que liga o pilar a placa base, segue o artigo 60º do REAPE, figura 20 h).

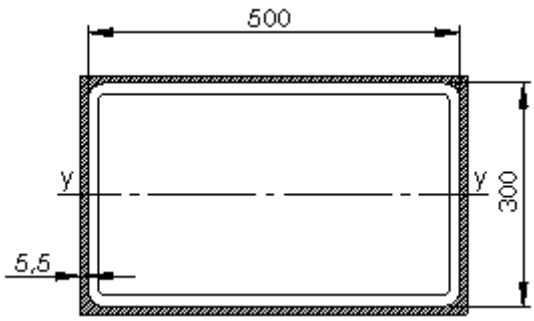


Figura 8.6 – Pormenor dos cordões de soldadura

Tabela 8.3 – Valores dos esforços actuantes (Posição $\boldsymbol{P13}$ do carro guincho)

	Pontos Críticos	N_{sd} $[kN]$	$V_{sd.x-y}$ $[kN]$	$V_{sd.x-z}$ $[kN]$	$V_{sd.y-z}$ $[kN]$	$M_{sd.x}$ $[kN.m]$	$M_{sd.y}$ $[kN.m]$	$M_{sd.z}$ $[kN.m]$
$\boldsymbol{P11}$	18	253,4 (C)	-	$-5{,}6$	6,2	0	$-44{,}7$	0,4
$\boldsymbol{C14}$	18	43,3 (C)	$-6{,}2$	$-340{,}1$	-	0	$-200{,}8$	$-3{,}8$

De acordo com os esforços da tabela acima e tendo em conta o referencial usado tem-se,

$$N = N_{sd}(P11) = 253{,}4\ kN$$
$$V_1 = V_{sd,x-y}(C13) = 6{,}2\ kN$$
$$V_2 = N_{sd}(C13) = 43{,}3\ kN$$
$$M_1 = M_{sd,y}(P11) = 44{,}7\ kN.m$$

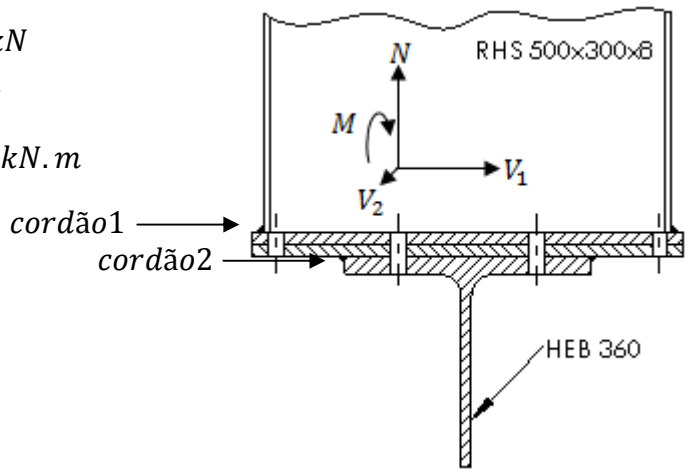


Figura 8.7 – Esforços no cordão de soldadura

A espessura mínima na ligação é a espessura do tubo com $t_{tubo} = 8\,mm$, pois a chapa tem uma espessura de $t_{chapa} = 15\,mm$. Então, pode-se escrever o seguinte:

$$3 \leq a \leq 0{,}7 \times t_{tubo} = 5{,}6 \Rightarrow a = 5{,}5\,mm$$

Para os cordões horizontais, desprezam-se os esforços transversos na direcção V_2, ou seja o esforço transverso perpendicular aos cordões horizontais.

$$\sigma_{sd,ref} = \frac{1}{0{,}77}\left(\frac{N_{sd}}{\sum l \times a} \pm \frac{M_{sd,x}}{h\,l\,a}\right)$$

Onde,

$$\sum l \times a = 2(300 \times 5{,}5 + 500 \times 5{,}5) = 8800\,mm^2$$

Então,

$$\sigma_{sd,ref} = \frac{1}{0{,}77}\left(\frac{253{,}4 \times 10^3}{8800} \pm \frac{44{,}7 \times 10^6}{300 \times 500 \times 5{,}5}\right) = 107{,}8 < f_y = 235\,Mpa$$

Condição verificada.

Para os cordões verticais, despreza-se o momento flector.

$$\sigma_{sd,ref} = \frac{1}{0{,}90}\sqrt{1{,}4\left(\frac{N_{sd}}{\sum l \times a}\right)^2 + 1{,}8\left(\frac{V_2}{\sum l_{vertical}\,a}\right)}$$

$$= \frac{1}{0{,}90}\sqrt{1{,}4\left(\frac{253{,}4 \times 10^3}{8800}\right)^2 + 1{,}8\left(\frac{43{,}3 \times 10^3}{2 \times 300 \times 5{,}5}\right)^2} = 42{,}6 < f_y = 235\,Mpa$$

Condição verificada.

Os restantes esforços não são considerados, pois são muito pequenos, e sua contribuição é insignificante.

Cordão 2

A espessura mínima na ligação é a espessura da chapa $t_{chapa} = 15\,mm$, pois o banzo tem uma espessura de $t_{banzo} = 22{,}5\,mm$. Então, pode-se escrever o seguinte:

$$3 \leq a \leq 0{,}7 \times t_{chapa} = 10{,}5 \Rightarrow a = 5{,}5\,mm$$

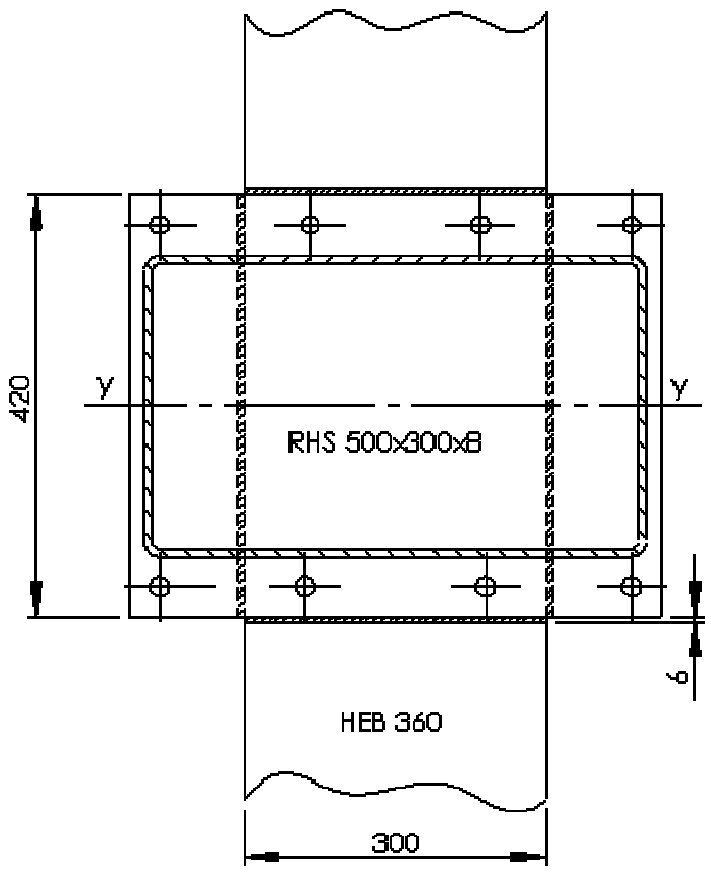


Figura 8.8 – Pormenor dos cordões de soldadura

Para os cordões horizontais, desprezam-se os esforços transversos na direcção V_2, ou seja o esforço transverso perpendicular aos cordões horizontais.

$$\sigma_{sd,ref} = \frac{1}{0{,}77}\left(\frac{N_{sd}}{\sum l \times a} \pm \frac{M_{sd,x}}{h\ l\ a}\right)$$

Onde,

$$\sum l \times a = 2(300 \times 5{,}5 + 420 \times 5{,}5) = 7920\ mm^2$$

Então,

$$\sigma_{sd,ref} = \frac{1}{0{,}77}\left(\frac{253{,}4 \times 10^3}{7920} \pm \frac{44{,}7 \times 10^6}{420 \times 300 \times 5{,}5}\right) = 125{,}3\ < f_y = 235\ Mpa$$

Condição verificada.

Para os cordões verticais, despreza-se o momento flector.

$$\sigma_{sd,ref} = \frac{1}{0{,}90}\sqrt{\left(\frac{N_{sd}}{\sum l \times a}\right)^2 + 1{,}8\left(\frac{V_2}{\sum l_{vertical}\ a}\right)}$$

$$= \frac{1}{0{,}90}\sqrt{1{,}4\left(\frac{253{,}4 \times 10^3}{7920}\right)^2 + 1{,}8\left(\frac{43{,}3 \times 10^3}{2 \times 420 \times 5{,}5}\right)^2} = 44{,}3 < f_y = 235\ Mpa$$

Condição verificada.

Os restantes esforços não são considerados, pois são muito pequenos, e sua contribuição é insignificante.

8.5. Viga resistente

O dimensionamento do cordão de soldadura que liga as almas ao banzos da viga resistente, segue o artigo 60º do REAPE, figura 25 g). O esforço transverso máximo, verificado para a viga resistente tem um valor de $V_1 = -239{,}2\ kN$.

A espessura mínima na ligação é a espessura da chapa $t_{alma} = 7\ mm$, pois o banzo tem uma espessura de $t_{banzo} = 8\ mm$. Então, pode-se escrever o seguinte:

$$3 \leq a \leq 0{,}7 \times t_{tubo} = 4{,}9 \Rightarrow a = 4{,}5\ mm$$

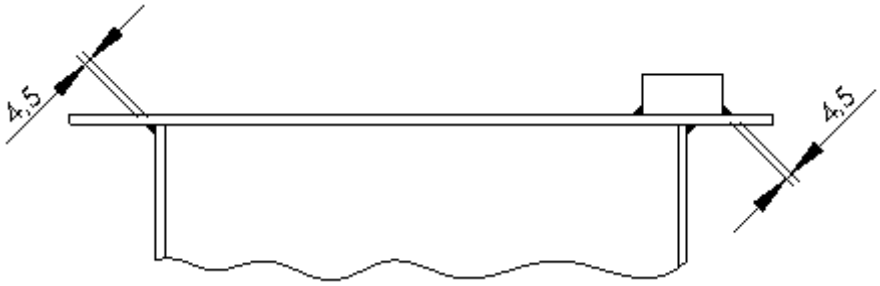


Figura 8.9 – Pormenor dos cordões de soldadura

De acordo com o REAPE se a espessura do cordão de soldadura respeitar a condição, $a \geq e_{alma}/2 \Rightarrow 4{,}5 \geq 7/2 = 3{,}5\ mm\ OK$, então não é necessária a verificação da segurança. Estes cordões estendem-se pelo comprimento total da viga resistente.

Para o cordão de soldadura que liga o carril ao banzo superior, é usado um cordão com a mesma espessura que a utilizada para a ligação alma banzo. Também aqui o cordão de soldadura será contínuo, para assim prevenir problemas de corrosão que possam ocorrer entre o carril e o banzo pois nessa zona não terá qualquer tipo de tratamento anti-corrosivo.

Para os restantes cordões, usa-se uma espessura não superior a $0{,}7\ mm$ da menor espessura dos elementos a ligar.

9. Conclusão

Neste trabalho apresentou-se a metodologia de dimensionamento de um Pórtico rolante, tendo por base as Normas F.E.M e o Eurocódigo 3.

Fixadas as dimensões e o valor da carga a movimentar pelo pórtico foram determinadas as acções sobre a estrutura de acordo com o especificado pela FEM. Para a verificação da resistência das secções foi o Eurocódigo 3 e os aspectos específicos tratados na norma FEM. Foi dado particular ênfase aos aspectos de verificação da resistência das secções tendo em vista os múltiplos mecanismos de ruína previstos no regulamento.

Muitas das questões analisadas no dimensionamento do pórtico são aplicáveis ao caso de uma ponte rolante convencional pois os requisitos de funcionamento são semelhantes.

O projecto do Pórtico Rolante fica concluído com os desenhos de definição 2D.

10. Bibliografia

1. Helmut, Ernest, Aparatos de levacion y Transporte.

2. F.E.M. Federation Europeenne de la Manutention : Rules for Design of Hoisting Appliances, 1998, 3º Edition.

3. Eurócodigo 3 : Projecto de estruturas de aço - Parte 1.1 - Instituto Portugês da Qualidade, ENV 1993-1, 1998

4. Regulamento de Estruturas em aço para Pontes e Edifícios (REAPE), Imprensa Nacional - Casa da Moeda, 1986

5. Gomes, Carlos Reis, *Mecânica das Eestruturas 1*, Cap. 5 DEMEC, 2010.

6. Alvarez, Arguelles, *Estruturas de Acero*, Vol.1 Bellisco, 2007.

7. *Bases de calcul pour roulement de pounts roulants,* Centre Suice de la Construction Métalique, 1979.

8. www.stahlcranes.com

9. www.gantrail.com

10. Morais, Simões, Desenho Técnico Básico - Desenho de Constroção de Máquinas, Vol.3, Porto Editora, 2006.

11. Gomes, Carlos Reis, *Estruturas Metálicas*, Cap. 5,6, DEMEC, 2010.

12. Eurócodigo 3 : Projecto de estruturas de aço - Parte 1.1 - Instituto Portugês da Qualidade, ENV 1993-1, 2010

Anexos

Anexo 1 – Grupo do carro-guincho

R&M Materials Handling, Inc.
4501 Gateway Boulevard
Springfield, Ohio 45502
P.: (937) 328-5100
FAX: (937) 325-5319

3 Safe operation

3.1 Intended use of the hoist and ambient conditions

The hoist is intended for lifting and moving goods. The hoist may not be used for lifting and moving people. The hoist is intended for indoor use or for use in outdoor premises when specially equipped for the purpose. The ambient temperature should be -10 ... +40ºC (14…104ºF), with explosive proof hoists 20 ... +40ºC (14…104ºF), or, if specially equipped, -20 ... +50ºC (-4…122ºF). The relative humidity of th ambient should be less than 90%. If the hoist is used in exceptional ambient conditions (such as in a windy area, a corrosive atmosphere or in an area prone to earthquakes) or is used to handle dangerous materials (such as molten metal), any need for special equipment must be determined with the manufacturer or the manufacturer's representative.

3.2 Sound intensity level

The sound intensity level of the hoist in an operating location will not exceed 70dB (A).

3.3 Service classification of hoist

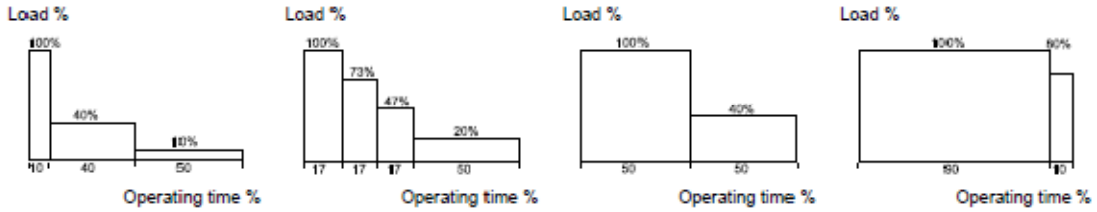
Safe and effective operation of the hoist is dependent on correct classification of the hoist's operating group. According to FEM9.511 standard the hoist's operating group can be determined from its:

- load spectrum
- average daily operating time

3.3.1 Load spectrum

The load spectrum can be determined from the table below.

LIGHT	MEDIUM	HEAVY	VERY HEAVY
Occasional full load.	Occasional full load.	Repetitive full load.	Usually almost full load.
Usually light load.	Usually light load.	Usually average load.	Very heavy fixed load.
Small fixed load.	Average fixed load.	Heavy fixed load.	



3.3.2 Average daily operating time

The average daily operating time of the hoist can be calculated from the running time of the hoisting machinery [hours/day].

$$t = \frac{2 * H * N * T}{V * 60}$$

H = average hoisting height [m]
N = number of work cycles per hour [cycles/h]
T = daily working time [h]
V = hoisting speed [m/min]

R&M Materials Handling, Inc.
1501 Gateway Boulevard
Springfield, Ohio 45502
PH: (937) 328-5100
FAX: (937) 325-5319

3.3.3 Determining the operating group of the hoist

When the load spectrum and the average daily operating time of the hoist are identified, the hoist's operating group is obtained from the table below.

Load spectrum	Average daily operating time (hours per day) ISO/FEM					
	≤ 0.5	≤ 1	≤ 2	≤ 4	≤ 8	≤ 16
LIGHT			M3 1Bm	M4 1Am	M5 2m	M6 3m
MEDIUM		M3 1Bm	M4 1Am	M5 2m	M6 3m	M7 4m
HEAVY	M3 1Bm	M4 1Am	M5 2m	M6 3m	M7 4m	
VERY HEAVY	M4 1Am	M5 2m	M6 3m	M7 4m		

3.4 Safe working principles

Carefully following safe working principles is one of the most effective ways of preventing damage to property and injury to personnel. The operator, serviceman and work manager for the hoist should be familiar with the safe working principles for the hoist. A service organization authorized by the manufacturer can provide training for operating the hoist and any maintenance services needed under a separate agreement.

Misuse of the hoist or improper servicing may result in an accident that cannot be prevented by the safety equipment. Crane Operator, operation and safety training will introduce the operator to the essential safe handling of loads with the hoist equipment and safety procedures to follow. Service training can also provide the preventive maintenance requirements of the hoist to prevent equipment failure effecting production and/or safety.

Work management has an important role in implementing the principles for using the hoist safely. Work management must ensure that the hoist and its accessories are fit for the intended purpose, and that servicing and maintenance of the equipment is carried out as scheduled. Management must also ensure that personnel are adequately trained in the safe operation of handling loads.

The hoist operator, the hoist serviceman and personnel in charge of hoist operation and servicing shall be familiar with and comply with the safe working principles described in the instructions.

Read all safety instructions supplied with products.

Study meaning of stickers on products.

3.5 Using the pushbutton controller

The hoisting and travel motions of the hoist as well as crane travel motions are controlled with the pushbutton controller or by remote control. Some pushbutton controllers and remote control units are provided with a selector switch that allows the same controller unit to be used to control several hoists and/or cranes. If the hoist has remote control (infrared or radio control) separate operating instructions for the remote controller are provided with the hoist. The direction symbols on the pushbutton controller conform to local requirements.

Anexo 2 – Catálogo do carro-guincho

STAHL CraneSystems

Standardprogramm 2/1, 4/1, 6/1, 8/1
Standard Programme 2/1, 4/1, 6/1, 8/1
Programme standard 2/1, 4/1, 6/1, 8/1

Seilzüge AS 7
AS 7 Wire Rope Hoists
Palans à câble AS 7

kg	FEM ISO	HW m	Hubwerk / Hoist / Palan: 50 Hz (60 Hz) m/min	Typ / Type	kW	*1	kg		kW	Zweischienenfahrwerke / Double rail crabs / Chariots birail: Spurweite/Track gauge/Empattement [mm] 900	1250	1400	1800	2240	2500	2800	3550	
20000	1Am M4	14	1,25/8	AS 7100-16 L1	4,6/30	24/4H82	1420	3/20	*6	-	-	2680	2730	2780	-	2990	3260	3/25
		24	(1,5/9,5)	(AS 7100-19) L2	(5,5/36)		1755			-	-	-	-	2960	-	3170	3440	
		36		L3			1945			-	-	-	-	-	-	3380	3650	
		48		2/1 L4			2185			-	-	-	-	-	-	-	3860	
	1Am M4	14	1,5/10	AS 7100-20 L1	5,6/38	24/4H82	1420	3/20	*6	-	-	2680	2730	2780	-	2990	3260	3/25
		24	(-)	(-) L2	(-)		1755			-	-	-	-	2960	-	3170	3440	
		36		L3			1945			-	-	-	-	-	-	3380	3650	
		48		2/1 L4			2185			-	-	-	-	-	-	-	3860	
	1Am M4	14	0,32...6,3	ASF 7100-12 L1	24	4H73	1360	3/20	*6	-	-	2680	2730	2780	-	2990	3260	3/25
		24	(0,4...7,5)	(ASF 7100-15) L2	(29)		1695			-	-	-	-	2960	-	3170	3440	
		36		L3			1885			-	-	-	-	-	-	3380	3650	
		48		2/1 L4			2125			-	-	-	-	-	-	-	3860	
	1Am M4	14	0,5...10	ASF 7100-20 L1	38	4H82	1395	3/20	*6	-	-	2680	2730	2780	-	2990	3260	3/25
		24	(0,5...10)	(ASF 7100-20) L2	(38)		1730			-	-	-	-	2960	-	3170	3440	
		36		L3			1920			-	-	-	-	-	-	3380	3650	
		48		2/1 L4			2160			-	-	-	-	-	-	-	3860	
25000	3m M6	7	0,75/5	AS 7063-20 L1	3,8/24	12/2H73	1715	3/20	*6	-	-	2830	2880	2930	2990	3140	3410	3/25
		12	(0,9/6)	(AS 7063-24) L2	(4,5/29)		1895			-	-	-	-	3110	3170	3320	3590	
		-		L3			-			-	-	-	-	-	-	-	-	
		18		4/1 L4			2315			-	-	-	-	-	-	-	4010	
	3m M6	7	1/6,3	AS 7063-25 L1	4,6/30	24/4H82	1865	3/20	*6	-	-	2980	3030	3080	3140	3290	3560	3/25
		12	(1,2/7,5)	(AS 7063-30) L2	(5,5/36)		2045			-	-	-	-	3260	3320	3470	3740	
		-		L3			-			-	-	-	-	-	-	-	-	
		18		4/1 L4			2465			-	-	-	-	-	-	-	4160	
	3m M6	7	0,25...5	ASF 7063-20 L1	24	4H73	1805	3/20	*6	-	-	2895	2945	2995	3055	3205	3475	3/25
		12	(0,3...6)	(ASF 7063-24) L2	(29)		1985			-	-	-	-	3175	3235	3385	3655	
		-		L3			-			-	-	-	-	-	-	-	-	
		18		4/1 L4			2405			-	-	-	-	-	-	-	4075	
	3m M6	7	0,3...6,3	ASF 7063-25 L1	30	4H82	1840	3/20	*6	-	-	2930	2980	3030	3090	3240	3510	3/25
		12	(0,4...7,5)	(ASF 7063-30) L2	(36)		2020			-	-	-	-	3210	3270	3420	3690	
		-		L3			-			-	-	-	-	-	-	-	-	
		18		4/1 L4			2440			-	-	-	-	-	-	-	4110	
	1Bm M3	14	0,8/5	AS 7125-10 L1	3,8/24	12/2H73	1270	3/20	*7	-	-	2970	3020	3070		3280	3550	3/25
		24	(1/6)	(AS 7125-12) L2	(4,5/29)		1605			-	-	-	-	3230	-	3460	3730	
		36		L3			1895			-	-	-	-	-	-	3670	3940	
		48		2/1 L4			2135			-	-	-	-	-		-	4150	
	1Bm M3	14	1/6,3	AS 7125-12 L1	4,6/30	24/4H82	1420	3/20	*7	-	-	3120	3170	3220		3430	3700	3/25
		24	(1,2/7,5)	(AS 7125-15) L2	(5,5/36)		1755			-	-	-	-	3400	-	3610	3880	
		36		L3			1945			-	-	-	-	-	-	3320	4090	
		48		2/1 L4			2185			-	-	-	-	-		-	4300	
	1Dm M3	14	1,25/8	AS 7125-16 L1	5,6/30	24/4H82	1420	3/20	*7	-	-	3120	3170	3220		3430	3700	3/25
		24	(-)	(-) L2	(-)		1755			-	-	-	-	3400	-	3610	2880	
		36		L3			1945			-	-	-	-	-	-	3320	3090	
		48		2/1 L4			2185			-	-	-	-	-		-	4300	
	1Bm M3	14	0,25...5	ASF 7125-10 L1	24	4H73	1360	3/20	*7	-	-	3060	3110	3160		3370	3640	3/25
		24	(0,3...6)	(ASF 7125-12) L2	(29)		1695			-	-	-	-	3340	-	3550	3820	
		36		L3			1885			-	-	-	-	-	-	3760	4030	
		48		2/1 L4			2125			-	-	-	-	-		-	4240	
	1Bm M3	14	0,4...8	ASF 7125-16 L1	38	4H82	1395	3/20	*7	-	-	3095	3145	3195		3405	3675	3/25
		24	(0,4...8)	(ASF 7125-16) L2	(38)		1730			-	-	-	-	3375	-	3585	3855	
		36		L3			1920			-	-	-	-	-	-	3795	4065	
		48		2/1 L4			2160			-	-	-	-	-		-	4275	
32000	2m M5	7	0,63/4	AS 7080-16 L1	3,8/24	12/2H73	1715	3/20	*6	-	-	2830	2880	2930	2990	3140	3410	3/25
		12	(0,75/4,7)	(AS 7080-19) L2	(4,5/29)		1895			-	-	-	-	3110	3170	3320	3590	
		-		L3			-			-	-	-	-	-	-			
		18		4/1 L4			2315			-	-	-	-	-		-	4010	

( ) 60 Hz
*1 Hubmotortyp
*6 50 Hz: 5/20 m/min: 0,50/2,0 kW, 20/40 %ED
60 Hz: 6,3/25 m/min: 0,60/2,4 kW, 20/40 %ED
*7 50 Hz: 5/20 m/min: 0,80/3,2 kW, 20/40 %ED
60 Hz: 6,3/25 m/min: 1,0/3,8 kW, 20/40 %ED

( ) 60 Hz
*1 Hoist motor type
*6 50 Hz: 5/20 m/min: 0.50/2.0 kW, 20/40 %DC
60 Hz: 6.3/25 m/min: 0.60/2.4 kW, 20/40 %DC
*7 50 Hz: 5/20 m/min: 0,80/3,2 kW, 20/40 %DC
60 Hz: 6,3/25 m/min: 1,0/3,8 kW, 20/40 %DC

( ) 50 Hz
*1 Type du moteur de levage
*6 50 Hz: 5/20 m/min: 0,50/2,0 kW, 20/40 %FM
50 Hz: 6,3/25 m/min: 0,60/2,4 kW, 20/40 %FM
*7 50 Hz: 5/20 m/min: 0,80/3,2 kW, 20/40 %FM
50 Hz: 6,3/25 m/min: 1,0/3,8 kW, 20/40 %FM

STAHL Crane Systems

Abmessungen [mm]
Dimensions [mm]
Dimensions [mm]

Seilzüge AS 7
AS 7 Wire Rope Hoists
Palans à câble AS 7

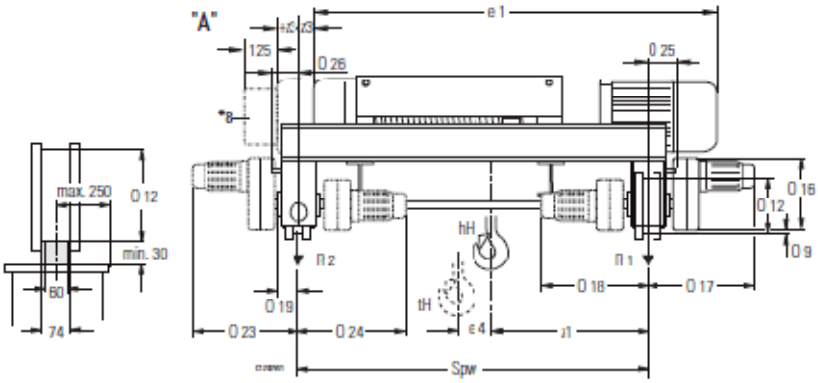
AS. 7..

Zweischienenfahrwerk	Double rail crab	Chariot birail
OE-R08 (2/1, 4/1), OE-R09 (4/1)	OE-R08 (2/1, 4/1), OE-R09 (4/1)	OE-R08 (2/1, 4/1), OE-R09 (4/1)

Auswahltabelle 2/1, 4/1 ↑ 3/8 — Selection table 2/1, 4/1 ↑ 3/8 — Tableau de sélection 2/1, 4/1 ↑ 3/8

		2/1	4/1	
			AS. 7100- AS. 7080- AS. 7063-	AS. 7125-
C		805	765	710
e4	-L1	288	144	144
	-L2	493	246	246
	-L3	739	-	-
	-L4	978	378	378
O1		2084	2084	2160
O2		1500	1500	1500
O3		292	292	330
O6		835	835	890
O8		711	765	765
O10		789	735	735
O12		Ø250	Ø250	Ø315
O19		104	104	127,5
O20		295	295	350
O25/26*6		213	213	227,5
R1/R2		↑ 3/49		

e1			
Hubmotor Typ *1 Hoist motor type Type de moteur de levage			
12/2H73	24/4H92	4H82	4H73
L1: 2185	L1: 2466	L1: 2382	L1: 2345
L2: 2595	L2: 2876	L2: 2792	L2: 2755
L3: 3085	L3: 3366	L3: 3282	L3: 3245
L4: 3565	L4: 3846	L4: 3762	L4: 3725



				O9	O16	O17 (O18) (O23) (O24) *5
	50 Hz *4 (60 Hz)					
	[m/min]	[kg]		[mm]		
O12 = Ø250	5/20 (6,3/25)	12500	-10	383	608
		16000	-10		663
		20000	-10		663
		25000	-10		663
		32000	-10		743
		40000	-10		743
	2,5/10 (3,2/12,5)	12500	-10	383	608
		16000	-10		608
		20000	-10		608
		25000	-10		608
		32000	-10		608
		40000	-10		663
	3/32 (10/40)	12500	-10	383	663
		16000	-10		743
		20000	-10		743
		25000	-10		737
		32000	-10		737
		40000	-10		737
O12 = Ø315	5/20 (6,3/25)	50000	-31	509	793
	2,5/10 (3,2/12,5)	50000	-31	509	719
	3/32 (10/40)	50000 *8	22	383	765

		2/1					4/1					
	Spw	1400	1800	2240	2800	3550	1400	1800	2240	2500	2800	3550
z1	L1	486	756	976	1256	1631	649	828	1048	1178	1328	1703
	L2	-	-	882	1153	1528	-	-	997	1127	1277	1652
	L3	-	-	-	952	1406	-	-	-	-	-	-
	L4	-	-	-	-	1222	-	-	-	-	-	1365
z3 (+z3)	L1	+95	35	255	535	910	+75	146	366	496	646	1021
	L2	-	-	+61	228	603	-	-	5	137	287	662
	L3	-	-	-	+61	235	-	-	-	-	-	-
	L4	-	-	-	-	+61	-	-	-	-	-	+30
O21		570	570	570	580	600	500	500	500	600	600	620
O22		446	446	446	456	476	466	466	466	476	476	496

*1 Zuordnung zu den Hubwerken siehe C060
*2 Frequenzumrichter FU nur bei ASF 7..
*3 Bremswiderstand nur bei ASF 7..
*4 Fahrmotoren ↑ C070
*5 Maße O18 und O24 auf Anfrage
*6 Maße O25 und O26 nur bei O18 und O24
*7 2 Fahrantriebe (O17, O23)
*8 Nur bei Hubmotor H92

*1 Assignment to wire rope hoists see C060
*2 Frequency convertor FU only on ASF 7..
*3 Brake resistance only on ASF 7..
*4 Travel motors ↑ C070
*5 Dimensions O18 and O24 on request
*6 Dimensions O25 and O26 only for O18 and O24
*7 2 travel drives (O17, O23)
*8 Only with hoist motor H92

*1 Affectation aux palans à câble voir C060
*2 Convertisseur de fréquence FU seulement pour ASF 7..
*3 Résistance de freinage seulement pour ASF 7..
*4 Moteurs de direction ↑ C070
*5 Cotes O18 et O24 sur demande
*6 Cotes O25 et O26 seulement pour O18 et O24
*7 2 entraînements de déplacement (O17, O23)
*8 Seulement avec moteur de levage H92

STAHL CraneSystems

Technische Daten
Technical Data
Caractéristiques techniques

Seilzüge AS 7
AS 7 Wire Rope Hoists
Palans à câble AS 7

C090

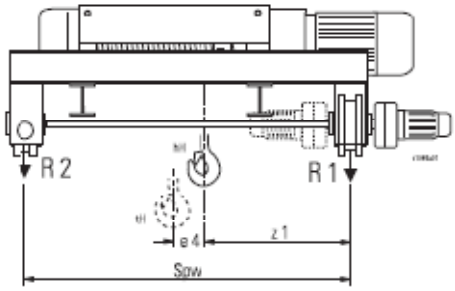
Radlasten | **Wheel loads** | **Réaction par galets**

Zweischienenfahrwerke | **Double rail crabs** | **Chariots birail**

AS 7

$$R_{1\,max} = \frac{Spw - z1}{2 \cdot Spw} \cdot Q + 0{,}3 \cdot Go$$

$$R_{2\,max} = \frac{z1 + e4}{2 \cdot Spw} \cdot Q + 0{,}2 \cdot Go$$



R1, R2 = Radbelastung (ohne Stoß- und Ausgleichszahl)
Q (kg) = Traglast + Totlast
Go (kg) = Gesamtgewicht ↑ 3/8, 3/13 (Seilzug + Fahrwerk)
Spw, z1, e4 ↑ 3/25

hH = höchste Hakenstellung
tH = tiefste Hakenstellung

R1, R2 = Wheel load (without impact and compensating factors)
Q (kg) = Lifting capacity + dead load
Go (kg) = Total weight ↑ 3/8, 3/13 (hoist + crab)
Spw, z1, e4 ↑ 3/25

hH = highest hook position
tH = lowest hook position

F1, R2 = Réaction de galets (sans facteur d'effort ni coefficient compensateur)
C (kg) = Capacité de charge + poids mort
Go (kg) = Poids total ↑ 3/8, 3/13 (palan + chariot)
Spw, z1, e4 ↑ 3/25

hH = position supérieure du crochet
tH = position inférieure du crochet

C100

Drahtseile | **Wire ropes** | **Câbles**

Seilzug Hoist Palan	Einscherung Reeving Moufle	Trommellänge Drum length Longueur du tambour	Seil Rope Câble Ø [mm]	Schlagrichtung Direction of lay Commettage *3	Oberfläche Surface Surface *4	Art *5	Bestell-Nr. Oder-no. No. de commande
AS 7063 AS 7080 AS 7100 AS 7125	1/1						
	2/1 4/1 6/1 8/1	1 - 5	25	sZ	t	B	330 054 9
	2/2-1	1 - 4	20	sZ	t	B	330 012 9
	4/2-1 8/2-1	1 - 4					
	4/2-2	1 - 3					
	2/2-1	1 - 4	20	zS	t	B	330 025 9
	4/2-1 8/2-1	1 - 4					
	4/2-2	1 - 3					
	2/2-2	1 - 4	20	sZ	t	A	330 056 9
	4/2-2	4					
	2/2-2	1 - 4	20	zS	t	A	330 057 9
	4/2-2	4					

*3 Schlagrichtung Seil:
sZ = rechtsgeschlagenes Seil (Seiltrommel mit Linksgewinde, Seilfestpunkt auf der Lagerseite)
zS = linksgeschlagenes Seil (Seiltrommel mit Rechtsgewinde, Seilfestpunkt auf der Getriebeseite
*4 vz = verzinktes Drahtseil, b = blankes Drahtseil
*5 A = drehungsarmes Drahtseil, B = Nicht drehungsarmes Drahtseil

*3 Direction of lay of rope:
sZ = rope with right-hand lay (rope drum with left-hand thread, rope anchorage on bearing side)
zS = rope with left-hand lay (rope drum with right-hand thread, rope anchorage on gear side)
*4 vz = galvanised wire rope, b = bright metal wire rope
*5 A = twist-free wire rope, B = non twist-free wire rope

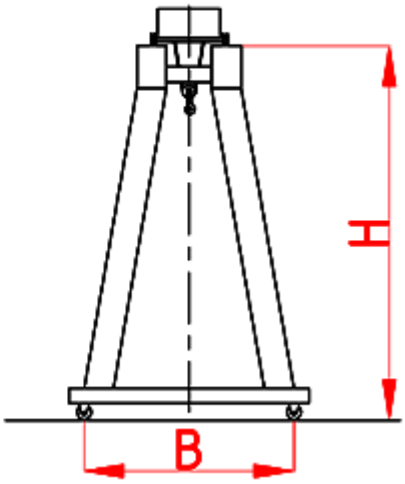
*3 Commettage du câble :
sZ = câble toronné à droite (tambour avec pas à gauche, attache du câble côté palier)
zS = câble toronné à gauche (tambour avec pas à droite, attache du câble côté réducteur)
*4 vz = câble galvanisé, b = câble clair
*5 A = câble antigiratoire, B = câble non antigiratoire

Anexo 3 – Dimensões (www.vincteknobank.com)

Wheel Base:

Selection of the wheel base:

- Wheel Base B:
  (B ≥ span / 5)
- Available space
- Permissable wheel forces
- Stability
- As general starting value we can use:
  B = H/2.5 ... H/2

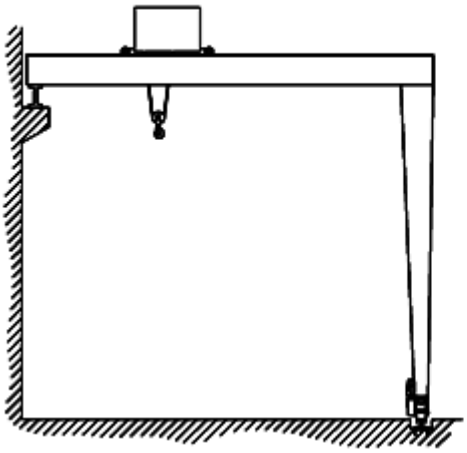


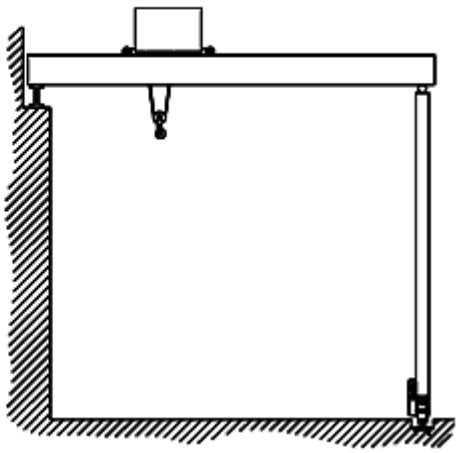
Approximate Design:

It is possible to rougly estimate the weight of a double girder gantry crane as follows:

- Estimate the weight of main girders and outfitting using an EOT crane label. Add 15%.
- Estimate the weight of the legs. Starting point is the weight of the two main girders divided by the span w (kg/m).
  Weight of the legs per height are:
  Stiff legs totally: 0.9 w (kg/m)
  Hinged legs totally: 0.4 w (kg/m)
- Calculate the wheel forces.
- Select the wheel size and end carriage.

Certain Types of Gantry Cranes:





Anexo 4 – Catálogo dos moto-redutores e bloco de rodas

STAHL CraneSystems

Radblöcke
Wheel Blocks
Unités d'entraînement

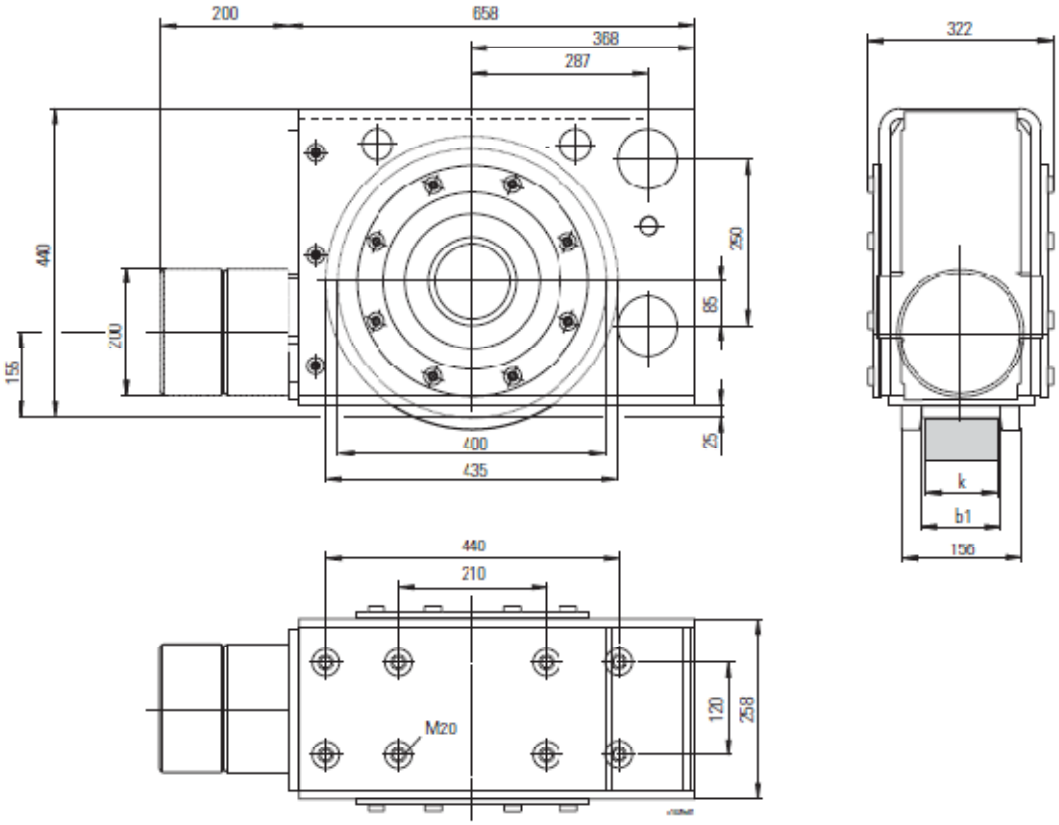
Auswahltabelle **Selection table** **Tableau de sélection**

Radblock / Wheel block / Unité d'entraînement						Fahrantriebe zum Radblock / Travel drives for wheel block / Entraînements en direction de l'unité d'entraînement								
Ø d	R_{zul} (H2/B3)	Typ Type *1	$R_{ld\,zul}$	kg		50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	F_{zul}	RB_{zul}	Typ Type	kg	
						100 Hz *5		100 Hz *5						
[mm]	[kg]			[kg]		[m/min]		[kW] *2		[kg]	[kg]		[kg]	
250	16000	SR-S 250.3R		76	15	10/40	12,5/50	0,32/1,25	0,36/1,50	13500	17500	SF 35226313	68	19
		SR-S 250.3L						0,50/2,00	0,60/2,40	20300		SF 35226423	78	
						5/20	6,3/25	0,13/0,55	0,16/0,66	12850		SF 35832133	62	
								0,32/1,25	0,36/1,50	26500		SF 35832313	73	
						4...40		2,20		20550		SF 35226384	62	
								3,20		40850		SF 35226484	68	
						2,5...25		0,75		13300		SF 35230184	55	
								2,20		38400		SF 35230384	62	
		SR-E 250.9R				10/40	12,5/50	0,32/1,25	0,36/1,50	14100	38700	SA-C 5726313	73	
		SR-E 250.9L						0,50/2,00	0,60/2,40	21200		SA-C 5726423	83	
								0,80/3,20	0,90/3,80	34900		SA-C 5726523	93	
						5/20	6,3/25	0,13/0,55	0,16/0,66	16900		SA-C 5732133	63	
								0,32/1,25	0,36/1,50	32850		SA-C 5732313	73	
								0,50/2,00	0,60/2,40	48950		SA-C 5732423	83	
						4...40		2,20		21600		SA-C 5726384	67	
			siehe					3,20		52400		SA-C 5726484	73	
			see			2,5...25		0,75		14050		SA-C 5730184	57	
			voir					2,20		40600		SA-C 5730384	67	
		SR-S 250.0	C095	76		-	-	-		-	-	-	-	-
315	22000	SR-E 315.9R		130	16	10/40	12,5/50	0,32/1,25	0,36/1,50	15100	38700	SA-C 5728313	73	19
		SR-E 315.9L	und Seite					0,50/2,00	0,60/2,40	22750		SA-C 5728423	83	
			and page					0,80/3,20	0,90/3,80	37300		SA-C 5728523	93	
			et page											
			6			5/20	6,3/25	0,13/0,55	0,16/0,66	17300		SA-C 5734133	63	
								0,32/1,25	0,36/1,50	33700		SA-C 5734313	73	
						4...40		2,20		23000		SA-C 5728384	67	
								3,20		47150		SA-C 5728484	73	
						2,5...25		0,75		15100		SA-C 5732184	57	
								2,20		43550		SA-C 5732384	67	
						10/40	12,5/50	0,50/2,00	0,60/2,40	21900	64700	SA-C 6728423	144	
								0,80/3,20	0,90/3,80	35750		SA-C 6728523	153	
						5/20	6,3/25	0,32/1,25	0,36/1,50	34100		SA-C 6734313	134	
								0,50/2,00	0,60/2,40	50800		SA-C 6734423	144	
								0,80/3,20	0,90/3,80	91000		SA-C 6734523	153	
						4...40		2,20		21900		SA-C 6728384	129	
								3,20		58600		SA-C 6728484	134	
						2,5...25		2,20		40600		SA-C 6732384	129	
								3.20		98200		SA-C 6732484	134	
		SR-E 315.0		118		-	-	-		-	-	-	-	-
400	30000	SR-E 400.9R		231	17	10/40	12,5/50	0,32/1,25	0,36/1,50	15800	24200	SA-C 5730313	73	19
		SR-E 400.9L						0,50/2,00	0,60/2,40	23750		SA-C 5730423	83	
						5/20	6,3/25	0,13/0,55	0,16/0,66	18750		SA-C 5736133	63	
								0,32/1,25	0,36/1,50	36400		SA-C 5736313	73	
						4...40		2,20		23800		SA-C5730384 F1	67	
								3,20		41900		SA-C5730484 F1	73	
						2,5...25		0,75		15100		SA-C5734184 F1	57	
								2,20		43600		SA-C5734384 F1	67	
								3,20		57200		SA-C5734484 F1	73	
						10/40	12,5/50	0,32/1,25	0,36/1,50	15400	54900	SA-C 6730313	134	
								0,50/2,00	0,60/2,40	23200		SA-C 6730423	144	
								0,80/3,20	0,90/3,80	37850		SA-C 6730523	153	
						5/20	6,3/25	0,13/0,55	0,16/0,66	18300		SA-C 6736133	124	
								0,32/1,25	0,36/1,50	35600		SA-C 6736313	134	
								0,50/2,00	0,60/2,40	53100		SA-C 6736423	144	
						4...40		2,20		23100		SA-C6730384 F1	128	
								3,20		61800		SA-C6730484 K1	134	
						2,5...25		2,20		44200		SA-C6734384 F1	128	
								3,20		89200		SA-C6734484 F1	134	
		SR-E 400.0		218		-	-	-		-	-	-	-	-

STAHL CraneSystems

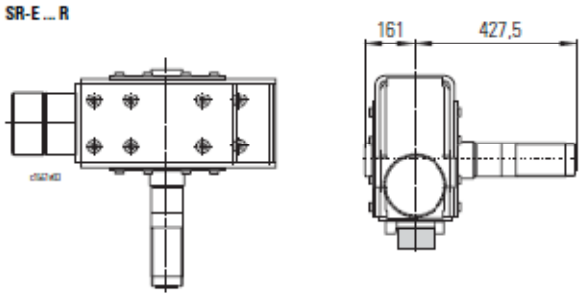
Radblöcke
Wheel Blocks
Unités d'entrainement

SR-E 400	Abmessungen [mm] Auswahltabelle ↑ 10	Dimensions [mm] Selection table ↑ 10	Dimensions [mm] Tableau de sélection ↑ 10



Typ Type	b1 *1	k
	[mm]	
SR-E 400	75	60-65
	85	70-75
	95	80-85
	115	100

SR-E ... R



*1 Andere Laufradausdrehungen auf Anfrage

*1 Other wheel treads on request

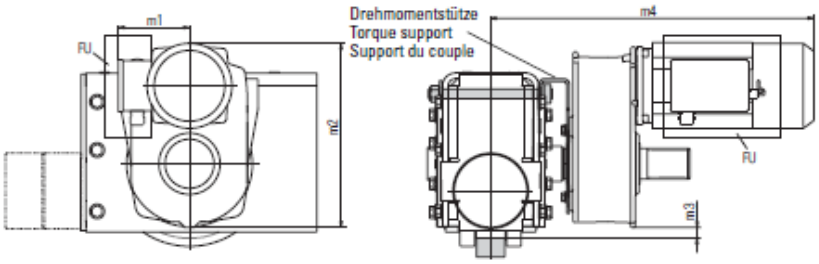
*1 Autres largeurs de gorge de galet sur demande

STAHL CraneSystems

Radblöcke
Wheel Blocks
Unités d'entraînement

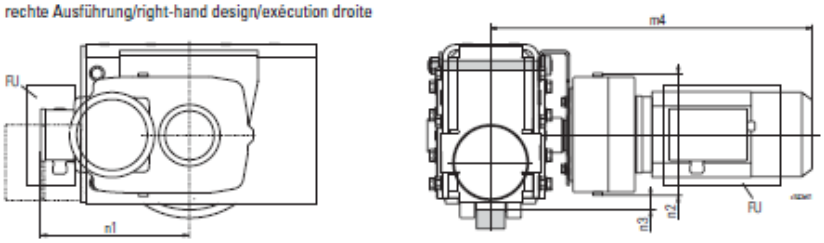
Abmessungen [mm]	**Dimensions [mm]**	**Dimensions [mm]**
Auswahltabelle ↑ 3/9	Selection table ↑ 3/9	Tableau de sélection ↑ 3/9

stehend
vertically
verticalement



Gezeichnet/illustrated/illustré:
rechte Ausführung/right-hand design/exécution droite

liegend
horizontally
horizontalement



SR-S 250							
Typ Type	m1	m2	m3	m4	n1	n2	n3
SF 352xx313	151	414	15	624	335	238	12
SF 352xx384				629			
SF 352xx423				704			
SF 352xx484				629			
SF 358xx133	159	451		673	343	267	
SF 358xx184							
SF 358xx313	183			728	367		
SF 358xx384				733			
SA-C 57xx123	131	373	-10	608	292	256	-6
SA-C 57xx133							
SA-C 57xx184							
SA-C 57xx313	151	380		663	316		
SA-C 57xx384				668			
SA-C 57xx423				743			
SA-C 57xx484				668			
SA-C 57xx523	164	400		737	329		

SR-E 315							
Typ Type	m1	m2	m3	m4	n1	n2	n3
SA-C 57xx133	127	405	22	630	292	288	27
SA-C 57xx184							
SA-C 57xx313	151	413		685	316		
SA-C 57xx384				690			
SA-C 57xx423				765			
SA-C 57xx484				690			
SA-C 57xx523	164	432		759	329		
SA-C 67xx423	169	475	-32	799	356	327	-12
SA-C 67xx484				724			
SA-C 67xx523				793	369		

SR-E 400							
Typ Type	m1	m2	m3	m4	n1	n2	n3
SA-C 57xx133	127	435	65	657	292	331	69,5
SA-C 57xx184							
SA-C 57xx313	151	455		712	316		
SA-C 57xx384				717			
SA-C 57xx423				792			
SA-C 57xx484				717			
SA-C 57xx523	164	474,5		786	329		
SA-C 67xx133	169	517	11	691	332	369	31
SA-C 67xx184							
SA-C 67xx313				746	356		
SA-C 67xx384				751			
SA-C 67xx423				826			
SA-C 67xx484				751			
SA-C 67xx523				820	369		

Radblöcke
Wheel Blocks
Unités d'entraînement

Technische Daten
Technical Data
Caractéristiques techniques

STAHL CraneSystems

C095

(Fortsetzung/continued/suite)

Zulässige ideelle Radlasten **Permissible ideal wheel loads** **Charges idéelles admissibles par galet**

SR-E 400

Zulässige Radlast (max.) *1 / Permissible wheel load (max.) *1 / Charge adm. par galet (max.) *1	Einstufung nach FEM (ISO) / Classification to FEM (ISO) / Classification selon FEM (ISO)	Schienenkopfbreite *2 / Railhead width *2 / Largeur du champignon *2	Zulässige ideelle Radlasten $R_{id\,zul}$ in [kg] bei Fahrgeschwindigkeit v in [m/min] / Permissible ideal wheel loads $R_{id\,zul}$ in [kg] at travel speed v in [m/min] / Charges idéelles admissibles par galets $R_{id\,zul}$ en [kg] avec vitesse de direction v en [m/min]											
R_{zul}		k_{eff}	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50	63	80	100
[kg]		[mm]	[kg]											
30000	1Dm (M3)	60	25900	25050	25350	24900	24450	23950	23300	22600	21900	21100	20250	19400
		70	30000	29950	29550	29100	28550	27950	27150	26400	25550	24600	23600	22650
		80	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	29150	28100	27000	25900
		100	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000
	1Am (M4)	60	23250	23000	22700	22350	21950	21450	20850	20250	19600	18900	18150	17400
		70	27100	26800	26500	26050	25600	25050	24350	23650	22850	22050	21150	20300
		80	30000	30000	30000	29750	29250	28600	27800	27000	26150	25200	24150	23200
		100	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	29000
	2m (M5)	60	20750	20550	20300	19950	19600	19150	18650	18100	17500	16850	16200	15550
		70	24200	23950	23650	23250	22850	22350	21750	21100	20400	19700	18900	18100
		80	27650	27350	27050	26600	26100	25550	24850	24100	23350	22500	21600	20700
		100	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	29150	28100	27000	25900
	3m (M6)	60	18650	18500	18250	17950	17600	17250	16750	16300	15750	15200	14550	14000
		70	21750	21550	21300	20950	20550	20100	19550	19000	18400	17700	17000	16300
		80	24900	24650	24350	23950	23500	23000	22350	21700	21000	20250	19450	18650
		100	30000	30000	30000	29900	29350	28750	27950	27150	26250	25300	24150	22600
	4m (M7)	60	16600	16400	16200	15950	15650	15350	14900	14450	14000	13500	12950	12450
		70	19350	19150	18900	18600	18250	17900	17400	16900	16350	15750	15100	14500
		80	22100	21900	21650	21250	20900	20450	19850	19300	18650	18000	17250	16550
		100	27650	27350	27050	26600	26100	25550	24850	24100	22600	21100	19650	18350
	5m (M8)	60	14500	14350	14200	13950	13700	13400	13050	12650	12250	11800	11350	10850
		70	16950	16750	16550	16300	16000	15650	15200	14750	14300	13800	13200	12700
		80	19350	19150	18900	18600	18250	17900	17400	16900	16350	15750	15100	14500
		100	24200	23950	23650	23250	22850	22350	21000	19650	18350	17150	15950	14900

Maximale Horizontalkraft: 20% von R_{zul}

Maximum horizontal force: 20% of R_{zul}

Forza horizontale massima: 20 % di R_{zul}

*1 Für Einstufung H2/B3 nach DIN 15018
*2 Schienenwerkstoff S355 (ST52) oder besser.
k_{eff} = effektive Schienenbreite mit Linienberührung. Ballige Schienen auf Anfrage.

*1 For classification H2/B3 to DIN 15018
*2 Rail material S355 (ST52) or better.
k_{eff} = effective rail width with line contact. Crowned rails on request.

*1 Pour classification H2/B3 selon DIN 15018
*2 Matière du rail S355 (ST52) ou meilleure.
k_{eff} = largeur effective de rail à contact linéaire. Rails bombés sur demande.

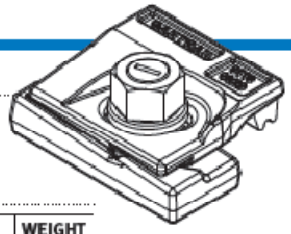
Anexo 5 – Catálogo dos grampos de fixação

9116/08

Gantrail Welded Base Fixing

GANTRAIL®
A world of crane rail expertise

www.gantrail.com



9116/08

The GANTRAIL 9116/08 adjustable crane rail clip is designed to fix light rails, on narrow girders, in the most arduous applications. It can withstand a horizontal force from the rail of 55kN (5.6 tonnes). Its low profile allows it to be used with cranes that are fitted with guide rollers.

SPECIFICATIONS:

MAX SIDE LOAD 55kN
8mm HORIZONTAL RAIL ADJUSTMENT

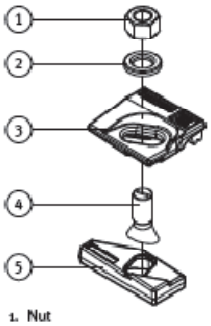
DIMENSIONS (mm):

REF NO.	X	Y (FULL NUT)	Y (THIN NUT)	Z	WEIGHT kg
9116/08/29	29	42	38	24	0.72
9116/08/37	37	42	38	24	0.73

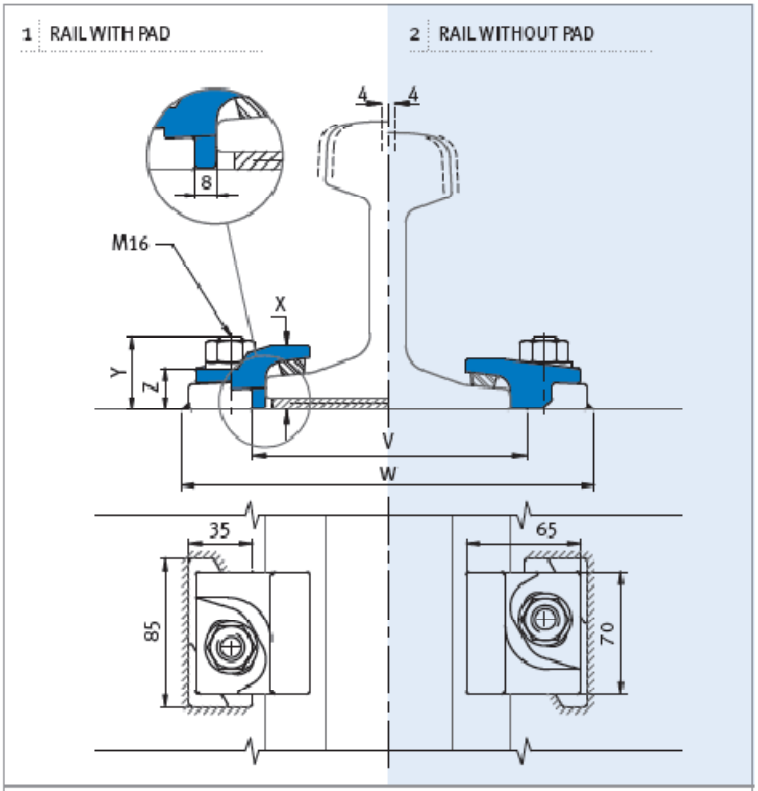
FEATURES

- The proven design has been used successfully for many years throughout the world.
- The clip is welded to the rail support. No access is required from below.
- The two main parts are locked together on tightening the grade 8.8 bolt.
- The clip has a self-tightening mechanism.
- A special vulcanised rubber block applies a controlled force to the rail.

COMPONENTS



1. Nut
2. Hardened washer
3. Clip cap with integral rubber block
4. M16 Captive bolt
5. Weldable base

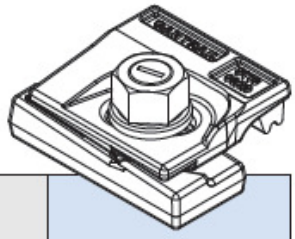


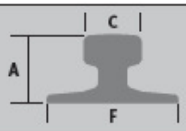
Minimum assembly width - W = Rail width (F) + 100mm V = Rail width (F) + 16mm
NOTE: For ground track with M20 anchor bolts W = Rail width (F) + 130mm

9116/08/ET/02/10

9116/08

Gantrail Welded Base Fixing



	F mm	C mm	A mm	1. CLIP REFERENCE FOR RAIL WITH PAD	2. CLIP REFERENCE FOR RAIL WITHOUT PAD
A 55	150	55	65	9116/08/37	9116/08/29
A 65	175	65	75	9116/08/37	9116/08/29
A 75	200	75	85	9116/08/37	9116/08/29
A 100	200	100	95	9116/08/37	9116/08/29
S 30	108	60	108	9116/08/37	9116/08/29
S 33	105	58	134	9116/08/37	9116/08/29
S 41	125	67	138	9116/08/37	9116/08/29
S 49	125	67	149	9116/08/37	9116/08/29
56 E 1	140	70	159	9116/08/37	9116/08/29
GCR 108	263	61 + 61	100	9116/08/37	9116/08/29
ISCR 60	105	60	105	9116/08/37	9116/08/29
ISCR 80	130	82	130	9116/08/37	9116/08/29
QU 70	120	70	120	9116/08/37	9116/08/29
QU 80	130	80	130	9116/08/37	9116/08/29
ASCE 80	127	64	127	9116/08/37	9116/08/29
ASCE85	132	65	132	9116/08/37	9116/08/29
ISCOR 48	127	68	150	9116/08/37	9116/08/29
ISCOR 57	140	70	165	9116/08/37	9116/08/29
JIS 37	122	63	122	9116/08/37	9116/08/29
31 kg AS	108	64	118	9116/08/37	9116/08/29
41 kg AS	127	64	137	9116/08/37	9116/08/29
50 kg AS	127	70	154	9116/08/37	9116/08/29
UIC 54	140	70	159	9116/08/37	9116/08/29
UIC 60	150	72	172	9116/08/37	9116/08/29

THIS CLIP CAN BE USED FOR A WIDER SELECTION OF RAILS THAN ILLUSTRATED.
Please contact GANTRAIL for the full range of possible rails. All rails can be fastened with bolted or welded base clips.
GANTRAIL may change or improve their products and also alter specifications without notice.

INSTALLATION INSTRUCTIONS:

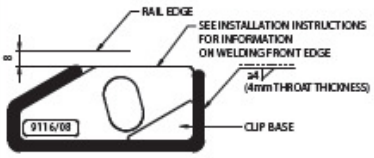
Weld all round the clip base, except the side closest and parallel to the rail, with a 4mm throat thickness fillet weld, using low hydrogen electrodes.

If a continuous weld around the clip base is required, this is possible. Please consult GANTRAIL for guidance.

TIGHTENING TORQUE 125Nm

Please contact GANTRAIL, for full installation instructions.

WELD DETAIL



A world of crane rail expertise.

www.gantrail.com

GANTRAIL®
A world of crane rail expertise

Gantry Railing Ltd
Sudmeadow Road
Hempsted
Gloucester GL2 5HG
ENGLAND

Tel: +44 (0) 1452 300688
Fax: +44 (0) 1452 300198
E-mail: info@gantrail.com

Gantrail (Middle East) Ltd
P O Box 61428
Jebel Ali Free Zone
Dubai
United Arab Emirates

Tel: +971 4 8812 935
Fax: +971 4 8812 936
E-mail: gme@gantrail.com

Certificate No. 5180

9116/08/ET/02/10